

**ANALISIS PENUTUP BALIK OTOMATIS SEBAGAI
PENGAMAN GANGGUAN SISTEM DISTRIBUSI
MENGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK MATLAB**

SKRIPSI

Oleh:

**YUSUF EFENDI
NPM. 088120038**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2011**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 19/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)19/9/23

RINGKASAN

Suatu sistem tenaga listrik harus dapat diandalkan dalam hal kontinuitas pelayanan energi listriknya. Penyaluran energi listrik dari pusat-pusat pembangkit ke konsumen sebagian besar melalui hantaran terbuka, sehingga besar kemungkinan untuk mengalami gangguan dari luar. Bila terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik, di usahakan agar pengaruh gangguan tersebut terhadap kontinuitas pelayanan adalah seminim mungkin, karena gangguan itu sendiri tidak dapat diperkirakan datangnya. Untuk mencapai tujuan tersebut, diperlukan suatu sistem pengamanan (proteksi).

Proteksi yang digunakan dalam suatu jaringan dapat dipandang sebagai suatu bentuk asuransi. Suatu persentase dari biaya modal keseluruhan (sekitar 5 %) digunakan untuk pengamanan, sehingga gangguan yang bersifat elektris tidak sampai mengakibatkan kerugian yang lebih besar karena kerusakan peralatan akibat panas lebih (overheating).

Disamping mengamankan peralatan atau material yang ada di sepanjang jaringan, proteksi juga berfungsi mengisolir atau membatasi luasnya daerah yang terganggu, dengan demikian akan memperkecil daerah pemadaman.

Gangguan yang bersifat sementara (temporer) akan mengakibatkan terbukanya Pemutus Tenaga, sehingga penyaluran energi listrik kepada konsumen tertunda untuk waktu yang lama, dan *Penutup Balik Otomatis* (Recloser) dapat mengatasi hal tersebut. Alat ini dapat secara otomatis bekerja untuk menutup

kembali pemutus tenaga dalam waktu yang relatif singkat. Berkisar antara 10

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 19/9/23

sampai 12 detik setelah pemutus tenaga membuka. Sedangkan gangguan yang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)19/9/23

bersifat tetap (permanen), Penutup Balik Otomatis akan menutup beberapa kali dan setelah melewati settingnya alat ini akan membuka dan tidak mampu lagi menutup (*Lock Out*).

Pada penelitian tugas akhir ini membahas tentang Jenis peralatan hubung/pemutus yang digunakan sebagai PMT pada Penutup Balik Otomatis di jaringan 20 KV, Gangguan-gangguan yang terjadi dalam kelistrikan dan persentase ditinjau secara umum, Perhitungan Arus gangguan hubung singkat hanya pada 3 fasa mengingat arus gangguan tersebut dipergunakan dalam perhitungan koordinasi relai, Bagian – bagian dan Prinsip kerja Recloser serta Perhitungan setting relai Invers dengan data-data dirujuk dari pustaka penelitian.

Pembahasan penelitian tersebut dianggap penting karena untuk menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik dari pusat-pusat pembangkit ke konsumen. Penggunaan recloser sebagai pengaman arus lebih dan hubung tanah merupakan jawaban untuk memperkecil kerugian-kerugian akibat gangguan pada jaringan tegangan menengah. Sistem Penutup Balik Otomatis membantu dalam percepatan penanggulangan gangguan yang terjadi berdasarkan analisa indikasi yang timbul di relai dan Rincian dari bagian suatu Penutup Balik Otomatis merupakan dasar mengenal Penutup Balik Otomatis yang lebih jelas.

Analisis gangguan dan setting relay dihitung dengan bantuan perangkat lunak matlab. Hal ini dilakukan sebagai upaya penyelesaian secara praktis penentuan setting pengaman ketika sistem mengalami gangguan.

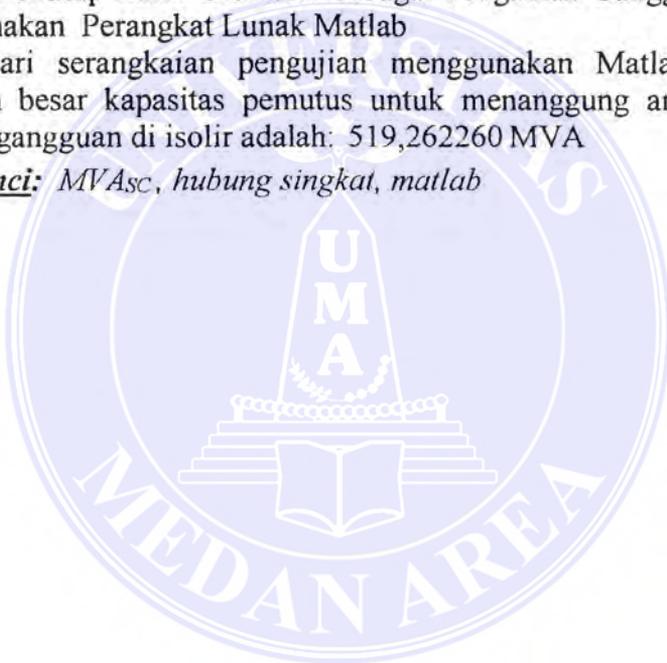
ABSTRAK

Gangguan pada sistem tenaga listrik yang bersifat sementara akan mengakibatkan terbukanya Recloser (Pemutus), sehingga penyaluran energi listrik kepada konsumen tertunda untuk waktu yang lama, dan Penutup Balik Otomatis (Recloser) dapat mengatasi hal tersebut. Alat ini dapat secara otomatis bekerja untuk menutup kembali pemutus tenaga dalam waktu yang relatif singkat. Sedangkan gangguan yang bersifat tetap (permanen), Penutup Balik Otomatis akan menutup beberapa kali dan setelah melewati settingnya alat ini akan membuka dan tidak mampu lagi menutup (*Lock Out*).

Kemampuan pemutus menahan arus gangguan sebelum pemutus tersebut mengisolir gangguan dilakukan dengan serangkaian pengujian hubung singkat simetris dan analisis MVA Short Circuit sehingga dilakukan penelitian tentang Analisis Penutup Balik Otomatis Sebagai Pengaman Gangguan Sistem Distribusi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab

Dari serangkaian pengujian menggunakan Matlab dan hasil analisis diperoleh besar kapasitas pemutus untuk menanggung arus gangguan tersebut sebelum gangguan di isolir adalah: 519,262260 MVA

Kata Kunci: *MVAsc, hubung singkat, matlab*



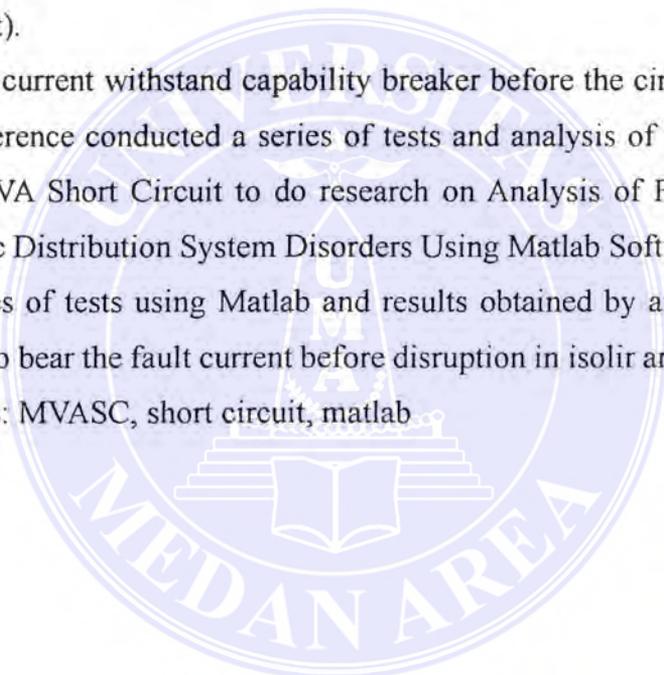
Abstrack

Disturbances of the power system will result in a temporary opening of the Recloser (Breaker), so distribution of electrical energy to consumers delayed for a long time, and Auto Flip Cover (Recloser) can overcome this. This tool can automatically work to close the circuit breaker in a relatively short time. While the disorder is fixed (permanent), Auto Flip Cover will close a few times and after going through the settings of these tools will not be able to open and close again (Lock Out).

Fault current withstand capability breaker before the circuit breaker to isolate the interference conducted a series of tests and analysis of the symmetrical short circuit MVA Short Circuit to do research on Analysis of Flip Cover For Safety Automatic Distribution System Disorders Using Matlab Software

Of a series of tests using Matlab and results obtained by analysis of the breaker capacity to bear the fault current before disruption in isolir are: 519,262,260 MVA

Keywords: MVASC, short circuit, matlab



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Osilogram Dari Arus Hubung Singkat.....	8
Gambar 2.2. Tipikal Trafo Arus Dengan Batang Pada Sisi Primer 1000/1 A.....	11
Gambar 2.3. Rangkaian Rele Arus Lebih.....	14
Gambar 2.4 Rangkaian Rele Arus Lebih.....	15
Gambar 3.1. Fasor Komponen Simetris.....	19
Gambar 3.2. Impendansi Seri Tidak Simetris.....	23
Gambar 3.3. Generator Tidak Berbeban Yang Ditanahkan Melalui Reaktor.....	24
Gambar 3.4. Jalur yang Digambarkan Untuk Arus Pada Setiap Urutan Dalam Generator dan Jaringan Urutan Yang Bersesuaian.....	25
Gambar 3.5. Diagram Rangkaian Untuk Gangguan Tunggal Dari Fasa ke Tanah pada Fasa A pada Terminal Generator yang tidak Dibebani Yang Netralnya di Tanahkan Melalui Reaktansi.....	28
Gambar 3.6 Tiga Penghantar Untuk Sistem 3 Fasa.....	29
Gambar 3.7 Diagram Rangkaian Untuk suatu Gangguan Antar Fasa, Antara Fasa B dan C pada Terminal Generator yang Tidak Dibebani Dengan Netral Yang Ditanahkan Melalui Reaktor.....	30
Gambar 3.8 Diagram Sambungan Batang-Batang Hipotesis untuk Suatu Gangguan Antar Fasa.....	32
Gambar 3.9 Rangkaian Untuk Gangguan Ganda Dari Fasa B Dan C Dalam Terminal Generator Tanpa Beban Yang Netralnya Ditanahkan.....	32
Gambar 3.10 Diagram Sabungan Batang-Batang Hipotesu untuk Suatu Gangguan Antar Fasa ke Tanah.....	34

DAFTAR ISI

RINGKASAN	ii
RIWAYAT HIDUP	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR ISI	x

BAB I PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Rumusan Masalah	2
I.3. Batasan Masalah.....	2
I.4. Tujuan Penulisan.....	3
I.5. Metode Penulisan.....	3
I.6. Sistematika Penulisan.....	3

BAB II GANGGUAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV

II.1. Umum	5
II.2. Gangguan Pada Jaringan Tegangan Menengah.....	5
II.3. Macam- Macam Gangguan.....	6
II.4. Amplitudo Arus Hubung Singkat.....	8
II.5. Prinsip Penutup Balik Otomatis.....	9
II.6. Tranducer Sebagai Pemberi Perintah Masukan Pada Rele.....	10

II.7.	Trafo Arus (CT).....	11
II.8.	Power Supply AC/DC.....	12
II.9.	Rele Sebagai Pemberi Perintah Pada Pemutus Rangkaian.....	13
II.10.	Syarat-Syarat Rele Pengaman.....	13
II.11.	Prinsip Kerja Recloser Dalam Mengisolir Gangguan.....	14

BAB III ANALISA SISTEM GANGGUAN SEIMBANG

III.1.	Umum	16
III.2.	Komponen Simetris.....	18
III.3.	Tegangan Pada Komponen Simetris.....	19
III.4	Arus Pada Komponen Simetris.....	22
III.5.	Impedansi Seri Tidak Simetris.....	23
III.6.	Jaringan Urutan Generator Tidak Berbeban.....	23
III.7.	Gangguan-Gangguan Tidak Simetris.....	26
III.8.	Gangguan Tunggal Dari Saluran Ke Tanah.....	26
III.9.	Gangguan Antar Dua Fasa.....	29
III.10.	Gangguan Ganda Dari Fasa Ke Tanah.....	32
III.11.	Gangguan 3 Fasa Hubung Singkat pada Generator Tanpa Beban..	34

BAB IV ANALISIS ARUS GANGGUAN DAN KAPASITAS PEMUTUS SEBAGAI PENGAMAN ARUS HUBUNG SINGKAT

IV.1.	Umum.....	36
-------	-----------	----

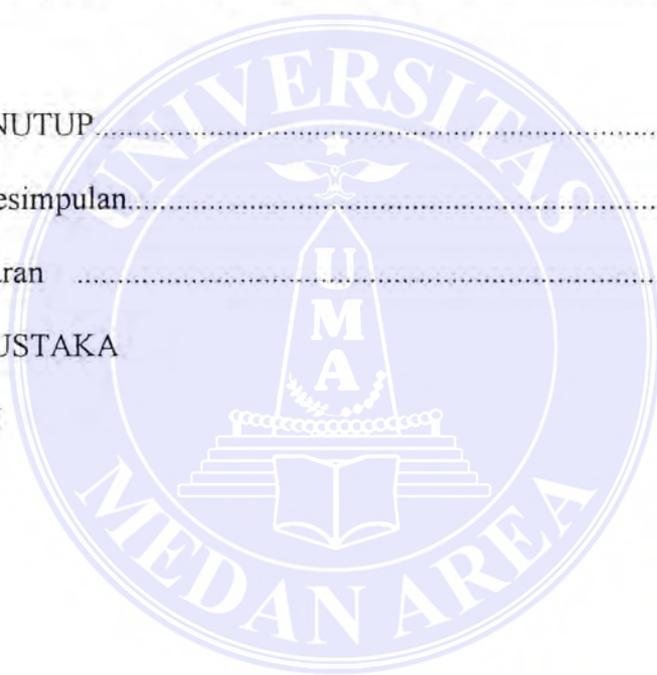
UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 19/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

IV.2. One Line Diagram Sistem Yang di Analisa.....	36
IV.3. Analisis Hubung Singkat Simetris Menggunakan Matlab.....	37
IV.3.1. Input Data Sistem Pada Matlab.....	37
IV.3.2. Listing Program Hubung Singkat Simetris.....	38
IV.4. Hasil Run Hubung Singkat Menggunakan MATLAB.....	41
IV.5. Analisis Penentuan Kapasitas Pemutus.....	42
BAB V PENUTUP.....	43
V.1. Kesimpulan.....	43
V. 2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Suatu sistem tenaga listrik harus dapat diandalkan dalam hal kontinuitas pelayanan energi listriknya. Penyaluran energi listrik dari pusat-pusat pembangkit ke konsumen sebagian besar melalui hantaran terbuka, sehingga besar kemungkinan untuk mengalami gangguan dari luar. Bila terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik, di usahakan agar pengaruh gangguan tersebut terhadap kontinuitas pelayanan adalah seminim mungkin, karena gangguan itu sendiri tidak dapat diperkirakan datangnya. Untuk mencapai tujuan tersebut, diperlukan suatu sistem pengamanan (proteksi).

Proteksi yang digunakan dalam suatu jaringan dapat dipandang sebagai suatu bentuk asuransi. Suatu persentase dari biaya modal keseluruhan (sekitar 5 %) digunakan untuk pengamanan, sehingga gangguan yang bersifat elektrik tidak sampai mengakibatkan kerugian yang lebih besar karena kerusakan peralatan akibat panas lebih (overheating).

Disamping mengamankan peralatan atau material yang ada di sepanjang jaringan, proteksi juga berfungsi mengisolir atau membatasi luasnya daerah yang terganggu, dengan demikian akan memperkecil daerah pemadaman.

Gangguan yang bersifat sementara (temporer) akan mengakibatkan terbukanya Pemutus Tenaga, sehingga penyaluran energi listrik kepada konsumen tertunda untuk waktu yang lama, dan Penutup Balik Otomatis (Recloser) dapat mengatasi hal tersebut. Alat ini dapat secara otomatis bekerja untuk menutup

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Dikembalikan kepada penulis kembali pemutus tenaga dalam waktu yang relatif singkat. Berkisar antara 10

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

sampai 12 detik setelah pemutus tenaga membuka. Sedangkan gangguan yang bersifat tetap (permanen), Penutup Balik Otomatis akan menutup beberapa kali dan setelah melewati settingnya alat ini akan membuka dan tidak mampu lagi menutup (*Lock Out*).

Kemampuan pemutus menahan arus gangguan sebelum pemutus tersebut mengisolir gangguan dilakukan dengan serangkaian pengujian hubung singkat simetris dan analisis Short Circuit Capacity (SSC) atau sering dikenal juga dengan istilah MVA Short Circuit sehingga dilakukan penelitian tentang Analisis Penutup Balik Otomatis Sebagai Pengaman Gangguan Sistem Distribusi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab

I.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada Skripsi ini adalah Bagaimana menentukan Analisis kemampuan dari dimensi (ukuran) Kapasitas kemampuan CB saat Recloser membuka ketika sistem mengalami gangguan

I.3. Batasan Masalah

Dalam penulisan ini perlu dipertegas ruang lingkup pokok pembahasan mengingat kompleksitas permasalahan menyangkut bahan sesuai judul Tugas Akhir dan dengan pembatasan ini diharapkan kita dapat masuk ke persoalan dan mengantisipasi terjadinya salah pengertian dalam Skripsi ini. Batasan masalah dapat penulis uraikan sebagai berikut Perhitungan Arus gangguan hubung singkat Simetris (3 fasa) mengingat arus gangguan tersebut merupakan arus gangguan

UNIVERSITAS MEDAN AREA

maksimum dipergunakan dalam penentuan nilai kapasitas recloser Document Accepted 19/9/23

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

I.4. Tujuan Penulisan

Adapun yang menjadi tujuan penulisan skripsi ini adalah memaparkan bahwa:

1. Mengetahui Penggunaan recloser sebagai pengaman akibat gangguan hubung singkat untuk memperkecil kerugian-kerugian/kerusakan peralatan akibat gangguan pada jaringan tegangan menengah.
2. Dapat menghitung gangguan hubung singkat simetris dengan perangkat lunak matlab dan menganalisis kemampuan recloser menahan arus gangguan sesaat sebelum recloser tersebut benar-benar mengisolir gangguan

I.5. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah :

1. Studi literatur : berupa tinjauan pustaka dari buku-buku, jurnal ilmiah yang berkaitan dengan Sistem Tenaga Listrik
2. Berkonsultasi dengan pembimbing.
3. Pengamatan langsung terhadap objek penelitian melalui hasil analisis program Matlab

I.6. Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran mengenai skripsi ini, secara singkat dapat diuraikan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN Menguraikan Latar belakang, Tujuan Penulisan, Batasan Masalah, Metode Penelitian dan Sistematika Penulisan

BAB II GANGGUAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 kV Menguraikan tentang Jenis – Jenis gangguan pada jaringan Tegangan Menengah, Tegangan Lebih, dan Arus Hubung Singkat, Proses Kerja Pengaman akibat adanya Gangguan

BAB III ANALISA GANGGUAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK Membahas tentang Komponen Simetris, Tegangan, Arus pada Komponen Simetris, Impedansi Seri Tidak Simetris, Jaringan Urutan Generator, Tidak Berbeban, Gangguan – gangguan Tidak Simetris

BAB IV ANALISIS ARUS GANGGUAN DAN KAPASITAS PEMUTUS SEBAGAI PENGAMAN ARUS HUBUNG SINGKAT Membahas tentang perhitungan gangguan hubung singkat simetris dan penentuan kapasitas pemutus.

BAB V PENUTUP Membahas tentang Kesimpulan dan Saran dari hasil pembahasan – pembahasan sebelumnya.

BAB II

GANGGUAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV

II. 1 Umum

Setiap peralatan jaringan yang dipasang, dikehendaki untuk dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Dalam keadaan normal peralatan itu tergantung kepada tegangan kerja dan arus kerja. Tegangan kerja akan menyebabkan timbulnya gradien tegangan sedangkan arus kerja akan menyebabkan kenaikan suhu dan gaya-gaya elektro mekanis. Dalam keadaan demikian perlu dipenuhi jaminan bahwa peralatan harus dapat bekerja secara terus-menerus tanpa mengalami kerusakan dan cacat apapun sebagai akibatnya.

Menurut IEC (International Electrical Commision), tingkat isolasi peralatan dinyatakan dengan harga tegangan kerja (Power Frequency Voltage) dan nilai tegangan impuls yang sanggup ditahan oleh isolasi peralatan tersebut. Tegangan tertinggi sistem adalah nilai tertinggi yang dapat terjadi pada keadaan kerja normal pada setiap saat pada setiap titik sistem itu. Berdasarkan SPLN No. 1/1978 untuk tegangan tertinggi sistem 20 kV adalah sebesar 24 kV yaitu sama dengan rating tegangan peralatan.

II.2. Gangguan Pada Jaringan Tegangan Menengah

Jika terjadi gangguan hubung singkat dengan tiba-tiba, arus gangguan akan mempengaruhi stabilitas daya yang dapat merusak peralatan. Untuk menjamin kontinuitas pelayanan kembali kepada konsumen dan penggunaan daya secara

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang efisien maka dipakai peralatan pengaman guna mengata...
Access From (repository.uma.ac.id)19/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

disebabkan oleh gangguan hubung singkat. Salah satu dari peralatan pengaman adalah penutup balik otomatis yang dapat melokalisir gangguan yang terjadi pada sistem.

II.3. Macam-Macam Gangguan

Pada umumnya jenis gangguan pada sistem distribusi 20 kV dapat dibagi menjadi :

- a. Gangguan sementara (temporer)
- b. Gangguan semi permanen
- c. Gangguan permanen

Gangguan antar fasa pada saluran udara umumnya disebabkan karena angin, burung atau dahan pohon, sehingga menimbulkan gangguan sementara (temporer), yaitu gangguan yang berlangsung cepat dan bila telah selesai tidak meninggalkan bekas kerusakan apapun. Gangguan sementara pada saluran udara sangat dominan (menurut statistik $\pm 80\%$) dan cara terbaik untuk mengatasinya adalah dengan menggunakan recloser.

Tabel 2.1. Data Statistik gangguan dari Perancis (RFA) dan Amerika Serikat (EDF)

Gangguan	Statistik EDF	Statistik RFA
Sementara	72 %	88 %
Semi Permanen	14 %	6 %
Permanen	14 %	6 %
Jumlah	100 %	100 %

Gangguan sementara adalah gangguan yang berlangsung dengan waktu sangat pendek, dan perlu pemadaman jaringan beberapa saat (beberapa persepuluh detik) termasuk untuk menghilangkan busur api yang timbul. Gangguan sementara biasanya tidak menimbulkan kerusakan atau cacat apapun pada komponen jaringan.

Gangguan semi permanen adalah seperti gangguan sementara, hanya waktu pemadaman busur api tidak cukup dengan beberapa persepuluh detik saja, tetapi misalnya perlu waktu lebih dari sepuluh detik. Sebagai contoh gangguan yang disebabkan oleh binatang atau dahan pohon yang mengenai jaringan.

Gangguan permanen memerlukan serangkaian kegiatan manual untuk menghilangkannya, karena terjadinya kerusakan pada komponen jaringan.

Gangguan pada jaringan tegangan menengah yang mungkin terjadi secara umum antara lain berupa :

d. Gangguan fasa

Gangguan dimana terhubungnya dua fasa atau lebih secara langsung atau tidak langsung.

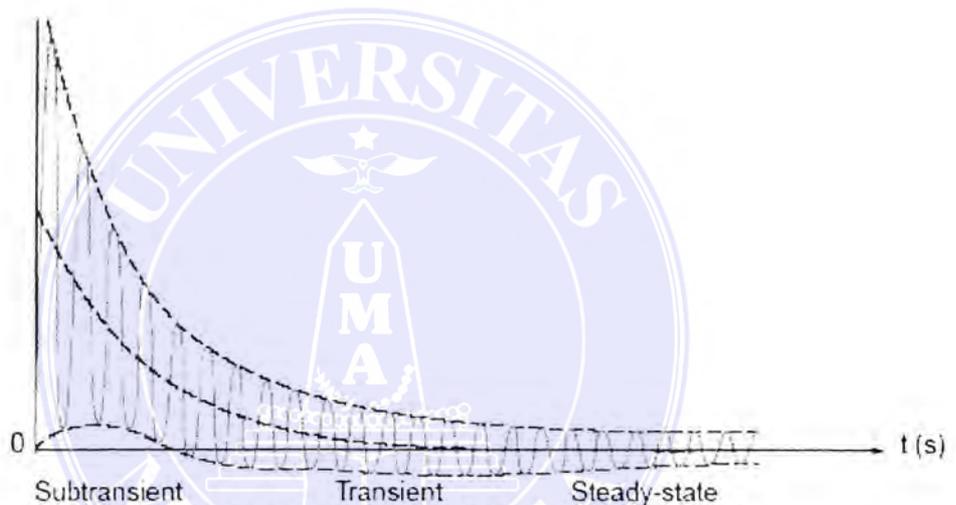
e. Gangguan tanah

Gangguan dimana terhubungnya satu fasa atau lebih ke tanah secara langsung atau tidak langsung. Yang dimaksud dengan tanah termasuk antara lain dengan tiang, body trafo, pohon dan lain-lain.

II.4. Amplitudo Arus Hubung Singkat

Arus hubung singkat mempunyai amplitudo yang sangat besar karena itu dapat menimbulkan kenaikan suhu yang sangat tinggi pada peralatan. Kenaikan suhu ini tergantung kepada besarnya arus hubung singkatnya dan lama berlangsungnya.

Gambar di bawah ini merupakan osilogram dari arus hubung singkat.



Gambar 2.1. Osilogram dari arus hubung singkat.

Terlihat bahwa pada periode-periode permulaan arus hubung singkat tersebut akan mengalami lonjakan asimetri (transient) tetapi kemudian akan berangsur-angsur menjadi stabil (stasioner) dan sebagai simetri sebagai akibat peredaman oleh impedansi rangkaian hubung singkat.

Untuk menghindarkan terjadinya kerusakan yang tidak diinginkan maka peralatan harus didesain untuk sanggup menahan tekanan arus hubung singkat dalam jangka waktu tertentu (sangat singkat, dalam orde detik). Tekanan hubung

singkat (short circuit stress) di suatu titik pada jaringan distribusi dinyatakan

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

dengan besaran arus (dalam kA) atau daya (dalam MVA), dan merupakan

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

kapasitas pemutusan yang dipersyaratkan untuk setiap peralatan yang dipasang disitu. Karena itu besarnya kapasitas pemutusan maksimum semua peralatan distandardkan, dan biasanya hasil dari studi tekno-ekonomi. Untuk jaringan distribusi tekanan hubung-singkat tidak akan melebihi rating kapasitas pemutusan trafo TT/TM di GI yang melayaninya. Karena itu rating kapasitas pemutusan setiap peralatan distribusi yang terpasang di situ dapat ditetapkan dengan ukuran kapasitas pemutusan trafo TT/TM tersebut. Peralatan 20 kV umumnya didesain untuk kapasitas pemutusan sampai 500 MVA.

II.5. Prinsip Penutup Balik Otomatis

Bagian utama dari unit penutup balik otomatis (recloser) sebagai peralatan pengaman arus lebih secara garis besar terdiri dari :

1. Transduser sebagai pemberi perintah masukan pada rele.
 - a) Trafo arus (CT)
 - b) Power suplai AC/ DC
2. Rele sebagai pemberi perintah pada pemutus rangkaian.
 - a) Rele arus lebih dan gangguan tanah
 - b) Rele penutup balik
3. Pemutus rangkaian (PMT)
4. Rangkaian pengendali (Kontrol)

Naiknya arus dan turunnya tegangan yang disebabkan oleh gangguan dapat digunakan sebagai tanda bahwa gangguan pada jaringan telah terjadi, rele pengaman merupakan unsur logika dari sistem perlindungan. Sinyal-sinyal tingkat

UNIVERSITAS MEDAN AREA

pendah yang dihasilkan oleh transduser adalah reproduksi yang cukup tinggi dari

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

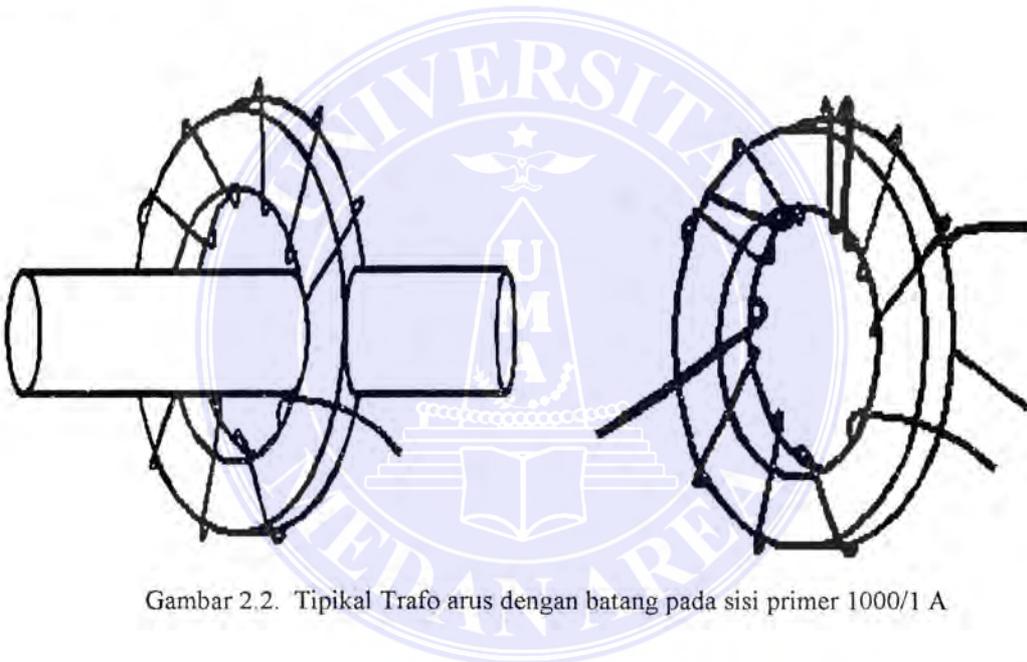
tegangan dan arus yang sebenarnya pada jaringan. Rele memperoleh sinyal masukan ini dan membuat keputusan bahwa suatu gangguan memang telah terjadi pada jaringan. Keputusan ini dicapai dalam waktu singkat setelah timbulnya gangguan, yaitu dengan nilai khas antara 8 sampai 40 milidetik tergantung pada rancangan (desain) rele tersebut. Keputusan yang diambil rele berupa daya yang diberikan ke rangkaian kemudi (Trip Circuit), tentu saja kontak pemutus rangkaian yang terhubung seri dengan jaringan mulai membuka dengan sangat cepat. Ketika arus yang melewati kontak pemutus (Arus Gangguan) nol, maka ruang di antara kontak tersebut menjadi suatu dielektrikum, dan dengan demikian dapat mencegah mengalirnya kembali arus gangguan melalui pemutus rangkaian. Hal ini berakibat terputusnya hubungan dari jaringan ke sebuah bagian lain dari sistem, dan dengan demikian gangguan telah dihindari. Keseluruhan proses, yaitu dari dimulainya gangguan hingga dibebaskannya sistem itu dari gangguan tersebut, memakan waktu antara 30 sampai 100 milidetik tergantung pada jenis sistem proteksi yang dipakai.

II.6. Transduser Sebagai Pemberi Perintah Masukan Pada Rele

Peralatan yang berfungsi sebagai transduser adalah trafo instrument baik berupa trafo arus maupun trafo tegangan. Trafo instrument ini digunakan untuk mengubah arus ke bentuk tegangan yang mungkin dalam tujuan pengukuran atau pengaman. Dalam pembahasan transduser, penulis membatasi masalah hanya pada trafo arus saja.

II.7. Trafo Arus (CT)

Trafo arus dipakai untuk memperoleh transformasi arus gangguan bagi bekerjanya relai arus lebih. Trafo arus untuk pengaman mempunyai daerah ketelitian yang luas dan tidak cepat jenuh. Biasanya pemasangannya berada di dalam tangki pemutus tenaga yang terpasang pada sisi primer bushing bagian dalam merupakan tipikal trafo arus digunakan sebagai transduser pada peralatan pengaman.



Gambar 2.2. Tipikal Trafo arus dengan batang pada sisi primer 1000/1 A

Trafo arus terpasang pada rangkaian primer, karena itu trafo arus harus beroperasi juga dalam keadaan hubung- singkat. Tekanan hubung singkat ini akan sangat berpengaruh pada bagian kumparnya. Dengan demikian penempatan trafo arus di jaringan perlu mempersyaratkan diketahuinya harga arus hubung singkat yang dapat timbul di situ, sehingga tekanannya tidak mengakibatkan rusaknya trafo arus terpasang. Desain trafo arus mempertimbangkan 2 buah harga,

- Arus hubung singkat termis, yaitu ketahanan termis trafo arus yang dinyatakan dalam kA atau sekian kali arus nominalnya, dihitung untuk selama satu detik.

Untuk 10 sampai 30kV³ :

$$I_{th} = 100 I_n$$

- Arus hubung singkat maksimum, yang akan memberikan tekanan dinamis terhadap trafo arus. Tekanan dinamis ini merupakan ketahanan mekanis dari trafo arus, besarnya adalah 2,5 kali I termis. Untuk golongan tegangan 10 sampai 30 kV³ normalisasi I dinamis peralatan adalah :

$$I^{dyn} = 180 \cdot 2 I_n = 250 I_n$$

Salah satu konstruksi trafo arus yang unik adalah jenis “Core Balance” yang sering disebut sebagai trafo arus urutan nol. Trafo arus ini digunakan untuk mendapatkan arus sisa sebagai akibat tidak seimbanganya vector arus pada ketiga fasa sistem karena gangguan tanah. Sebagai bagian primer dari rangkaian adalah hantaran (kabel) itu sendiri, sedangkan bagian sekunder berupa lilitan yang dibelitkan pada sebuah inti torida. Inti torida ini dilingkarkan pada kabel tersebut. Dengan demikian dimaksudkan agar kesalahan input bagi bekerjanya rele dapat dikurangi.

II.8. Power Suplai AC/DC

Sebuah Rele membutuhkan sumber arus, baik itu arus bolak balik maupun arus searah sesuai kebutuhan input sebuah rele. Umumnya rele tersebut membutuhkan 24-27 V. Untuk mendapatkan tegangan yang kecil ini, bias diperoleh dengan menggunakan trafo tegangan (PT), dimana sisi primernya PT

UNIVERSITAS MEDAN AREA

dihubungkan langsung dengan tegangan menengah 20 kV. Atau sumber arus

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

tersebut dapat juga diperoleh dari trafo distribusi 220/380 V yang berhubungan langsung dengan rangkaian Rectifier guna memperoleh arus searah (DC).

II.9. Rele Sebagai Pemberi Perintah Pada Pemutus Rangkaian

Rele pengaman adalah suatu alat yang menerima/merasakan ataupun mendeteksi adanya suatu perubahan kebesaran listrik yang tidak normal dari suatu sistem, yang kemudian memberikan informasi tersebut langsung atau tidak langsung untuk memutuskan rangkaian yang terganggu atau menghentikan alat yang terganggu ataupun memberi tanda sehingga perubahan-perubahan tersebut dapat diketahui.

II.10. Syarat-Syarat Rele Pengaman

Syarat – syarat penting rele pengaman haruslah memenuhi : Sensitif, Selektif, Dapat diandalkan, dan Cepat.

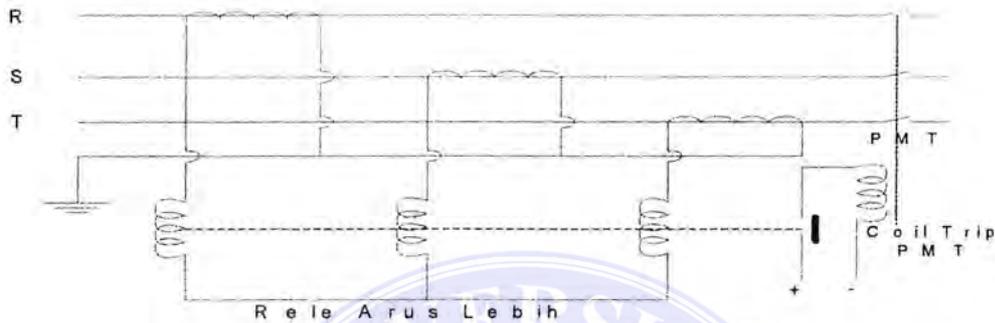
1. Sensitif

Pengaman (rele nya) harus cukup sensitive sehingga dapat bekerja dengan pasti jika diperlukan

2. Selektif

Pengaman harus selektif, artinya harus dapat membedakan keadaan yang memerlukan pemutusan segera, atau dengan suatu perlambatan waktu (Time Delay) atau tidak perlu pemutusan. Sehingga kalau terjadi pemutusan hanya bagian yang terganggu saja terpisah, atau pengaman hanya bekerja sesuai dengan fungsinya dan sesuai dengan daerah pengamanannya.

Khusus pembatasan masalah prinsip kerja relay proteksi hanya membahas rele arus lebih (Over Current Relay) dan rele hubung tanah (Ground Fault Relay)



Gambar 2.4. Rangkaian Rele Arus Lebih

- a. Dalam keadaan normal arus beban (I_b) mengalir pada konduktor, dan pada belitan sekunder CT ditransformasikan trafo arus menjadi arus relay (I_r). Jika arus beban masih normal maka arus rele masih kecil dari suatu harga arus yang ditetapkan (1 setting) sehingga saat itu rele belum bekerja.
- b. Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus I_b akan naik dan menyebabkan arus I_r naik pula. Jika arus I_r ini melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (setting) maka rele akan bekerja dan memberikan perintah trip ke coil Recloser untuk membuka switch Recloser, sehingga JTM yang terganggu dipisahkan dari sistem. Arus “lebih” akibat adanya gangguan hubung singkat dan memberikan sinyal trip ke Recloser sesuai dengan karakteristik waktunya.

BAB III

ANALISIS GANGGUAN SISTEM TENAGA LISTRIK

III.1. Umum

Perencanaan dan operasi dari sistem distribusi daya membutuhkan analisis yang terus menerus dan komprehensif untuk menilai keberhasilan sistem dan untuk menentukan keefektifan rencana yang lain dalam pengembangan sistem. Studi ini mempunyai peranan penting dalam membuat sistem yang mempunyai derajat keterandalan yang tinggi, aman dan bermutu dan dalam menyakinkan pemanfaatan modal secara maksimal.

Analisa rangkaian pada operasi sistem yang tidak seimbang biasanya diabaikan. Seringkali bila menjumpai operasi yang benar atau mendekati benar, diasumsikan operasi rangkaian yang seimbang dan rangkaian diselesaikan dengan dasar fasa per fasa. Hasilnya kemudian dikeluarkan untuk mendapatkan penyelesaian bagi dua fasa yang lain, ini untuk rangkaian tiga fasa. Hasil ini didapat dengan menghemat waktu dan usaha, dan biasanya jawabannya mempunyai ketelitian yang pantas. Bila sistem tidak seimbang, maka harus dipakai metode lain. Biasanya yang disukai adalah metode "komponen simetris". Metode ini memperbolehkan penggunaan analisis tiap fasa untuk sistem yang tidak seimbang, misalnya hubung singkat dari kesalahan-kesalahan.

Dalam sistem tenaga, gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam jaringan (sistem kelistrikan) ada 4, yaitu :

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa.
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa.

3. Gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah
4. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah..

Gangguan hubung singkat yang paling sering dibahas adalah gangguan 3 fasa. Karena gangguan ini akan menghasilkan arus gangguan terbesar. Sedangkan gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah pada kondisi tertentu yang akan menghasilkan arus gangguan lebih besar dari arus gangguan 3 fasa, bila harga Z_0 (impedansi urutan nol) pada tempat gangguan lebih kecil daripada impedansi urutan positif ($Z_1=Z_2$).

III.2. Komponen Simetris

Adapun prinsip dasar komponen simetris yang diterapkan pada rangkaian tiga fasa adalah ketentuan bahwa kumpulan tiga buah vektor yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga kelompok vektor yang seimbang. Setiap kelompok vektor yang seimbang tersebut terdiri dari tiga vektor yang mempunyai besaran yang sama dan beda sudut nol derajat atau 120 derajat.

Tiap kelompok vektor merupakan suatu komponen simetris dari tiap vektor-vektor asal yang tidak seimbang. Ketiga kelompok vektor yang seimbang ini adalah :

1. Komponen urutan positif, terdiri dari tiga buah vektor yang besarnya sama, berbeda fasa 120 derajat satu dengan yang lainnya, dan mempunyai urutan fasa sama dengan vektor asal.
2. Komponen urutan negatif, terdiri dari tiga buah vektor yang sama besarnya, berbeda fasa 120 derajat satu dengan yang lainnya, dan

UNIVERSITAS MEDAN AREA

mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan vektor asalnya. Accepted 19/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

3. Komponen urutan nol, terdiri dari tiga buah vektor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lainnya.

Pemecahan permasalahan dengan menggunakan komponen simetris, ketiga fasa dari sistem dinyatakan sebagai a, b dan c sehingga urutan fasa tegangan dapat dituliskan urutan fasa komponen urutan positif dinyatakan a b c dan jika fasornya adalah tegangan, maka tegangan tersebut dapat dinyatakan dengan V_a , V_b dan V_c . Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif dan 0 untuk urutan nol. Komponen urutan positif dari V_a , V_b , V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} . Demikian pula komponen urutan negatif adalah V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} , sedangkan komponen urutan nol adalah V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} .

Gambar 3.1 menunjukkan ketiga komponen tersebut.



Gambar 3.1. Fasor Komponen Simetris

III.3. Tegangan Pada Komponen Simetris

Karena setiap fasor tidak seimbang, yang asli adalah jumlah komponen, fasor asli yang dinyatakan dalam suku-suku komponennya adalah :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \tag{3.1}$$

Document Accepted 19/9/23

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

(3.2)
Access From (repository.uma.ac.id)19/9/23

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.3)$$

Karena adanya pergeseran fasa pada komponen simetris tegangan dan arus dalam sistem tiga fasa, akan sangat memudahkan bila kita mempunyai metode penulisan cepat untuk menunjukkan perputaran fasor dengan 120 derajat. Huruf a biasanya digunakan untuk menunjukkan operator yang menyebabkan perputaran sebesar 120 derajat dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dengan sudut 120 derajat dan didefinisikan sebagai :

$$a = 1 \angle 120^0 = -0,5 + j0,866$$

sehingga dapat dituliskan :

$$a^2 = 1 \angle 240^0 = -0,5 - j0,866$$

$$a^3 = 1 \angle 360^0 = 1$$

Dengan menggunakan a operator, dan dengan berpedoman pada Gambar 2 hubungan berikut dapat diperiksa kebenarannya.

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a^2 V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dengan mengulangi persamaan (3.1) dan memasukkan persamaan (3.4) ke dalam persamaan (3.2) dan (3.3) dihasilkan :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.5)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (3.6)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (3.7)$$

Atau dalam bentuk matriks :

$$\begin{pmatrix} V_u \\ V_b \\ V_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Untuk memudahkannya kita misalkan :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Maka determinan A adalah :

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Dan dengan memperkalikan kedua sisi persamaan (3.8) dengan A-1 kita peroleh :

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Yang menunjukkan pada kita bagaimana menguraikan tiga fasor tak simetris menjadi komponen simetris. Hubungan ini demikian pentingnya sehingga kita dapat menulis masing-masing persamaan itu dalam bentuk yang biasa. Dari persamaan (3.11), kita peroleh :

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3.12)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.13)$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

Document Accepted 19/9/23

Dari persamaan (3.12) menunjukkan bahwa tidak ada komponen urutan nol jika jumlah fasor tidak seimbang itu sama dengan nol. Karena jumlah fasor tegangan antar fasa pada sistem tiga fasa selalu nol, maka komponen urutan nol tidak pernah terdapat dalam tegangan fasa itu, tanpa memandang besarnya ketidakseimbangan. Jumlah ketiga fasor tegangan fasa ke netral tidak selalu harus sama dengan nol, dan tegangan ke netral dapat mengandung komponen urutan nol.

III.4. Arus Pada Komponen Simetris

Dengan cara yang sama persamaan (3.1) s.d (3.14) dapat dituliskan untuk arus sebagai ganti tegangan.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.15)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (3.16)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (3.17)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (3.18)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (3.18)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (3.19)$$

Dalam sistem tiga fasa, jumlah arus fasa sama dengan I_n dalam jalur kembali lewat netral. Jadi :

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (3.21)$$

Dengan membandingkan persamaan (3.18) dan (3.21) kita peroleh

$$I_n = 3I_{a0} \quad (3.22)$$

Jika tidak ada jalur yang melalui netral dari sistem tiga fasa, I_n adalah nol,

UNIVERSITAS MEDAN AREA
dan arus fasa tidak mengandung komponen urutan nol.

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 19/9/23

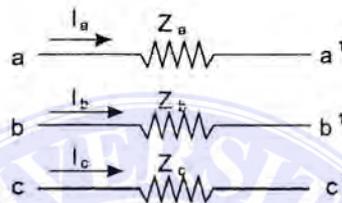
1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

III.5. Impedansi Seri Tidak Simetris

Kita tidak dapat mengabaikan pentingnya sistem yang dalam keadaan normal adalah seimbang dan menjadi tidak seimbang hanya karena timbulnya gangguan tak simetris. Akan tetapi, marilah kita lihat persamaan rangkaian tiga fasa bila impedansi serinya tidak sama seperti ditunjukkan pada gambar.3.2



Gambar 3.2. Impedansi seri tidak simetris

Dapat kita tuliskan,

$$V_{aa'} = I_a \cdot Z_a$$

$$V_{bb'} = I_b \cdot Z_b$$

$$V_{cc'} = I_c \cdot Z_c$$

Atau dalam bentuk matriks

$$\begin{pmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_a & 1 & 1 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \tag{3.23}$$

III. 6. Jaringan Urutan Generator Tidak Berbeban

Suatu generator tak berbeban, yang ditanahkan melalui reaktor, dapat dilihat

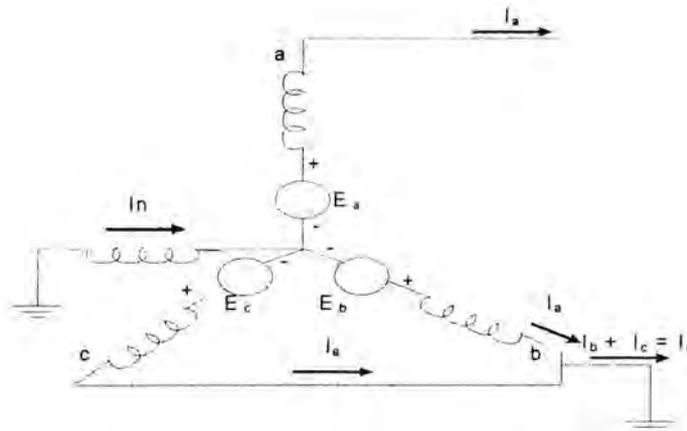
pada gambar 3.3. di bawah ini :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 19/9/23

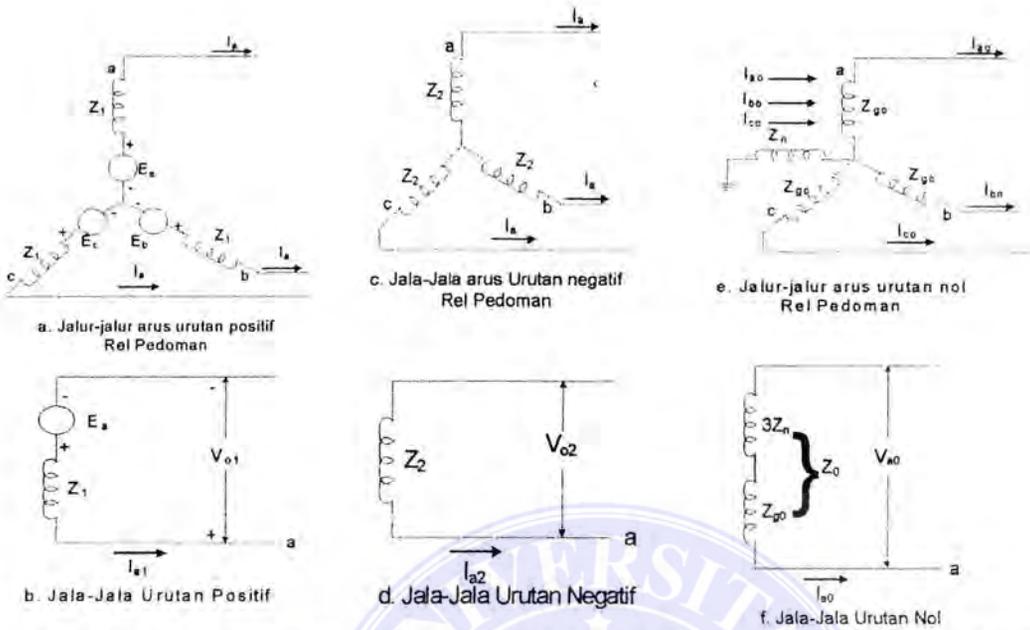
1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
 2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
 3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23



Gambar 3.3. Generator Tidak Berbeban yang ditanahkan melalui reaktor

Bila gangguan (yang tidak diperlihatkan dalam gambar) terjadi pada terminal generator itu maka I_a , I_b dan I_c akan mengalir ke netral generator dinyatakan sebagai I_n . Tegangan yang dibangkitkan hanyalah urutan positif saja. Oleh karena itu jaringan urutan positif terdiri dari suatu emf dalam hubungan seri dengan impedansi urutan positif generator itu. Jaringan urutan negatif dan urutan nol tidak mengandung emf, tetapi mencakup impedansi generator terhadap arus urutan negatif dan nol. Rel pedoman untuk jaringan urutan positif dan negatif itu sendiri, netral generator berada pada potensial tanah jika diantara netral tanah terdapat sambungan yang mempunyai impedansi tertentu atau nol, karena sambungan tersebut tidak akan mengalirkan arus urutan positif atau negatif. Arus yang mengalir pada impedansi Z_n diantara netral dan tanah adalah I_n . Dengan berpedoman pada Gambatr 4.1e, kita lihat bahwa jatuh tegangan antara urutan nol dari titik a ke tanah adalah $-I_n Z_m - I_{a0} Z_{g0}$, dimana Z_{g0} adalah impedansi urutan nol perfasa pada generator itu. Jaringan urutan nolnya, yang merupakan rangkaian

fasa tunggal yang dianggap hanya mengalirkan arus urutan nol salah satu fasanya



Gambar 3.4. Jalur yang digambarkan untuk arus pada setiap urutan dalam generator dan jaringan urutan yang bersesuaian

dengan demikian harus mempunyai impedansi sebesar $3Z_n + Z_{g0}$, seperti terlihat dalam gambar 3.4.1f. Impedansi urutan nol total dimana mengalir arus I_{a0} adalah :

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \tag{3.24}$$

Biasanya, komponen arus tegangan untuk fasa a diperoleh dari persamaan yang ditentukan oleh jaringan urutannya. Persamaan untuk komponen jatuh tegangan dari titik a fasa a ke rel pedoman (atau tanah) adalah, sebagaimana dapat diturunkan dari gambar 3.4. :

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1 \tag{3.25}$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2 \tag{3.26}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0$$

Document Accepted 19/9/23

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Dimana E_n adalah tegangan tanpa beban urutan positif ke netral Z_1 dan Z_2 impedansi urutan positif dan negatif generator dan Z_0 didefinisikan oleh persamaan (3.24).

III.7. Gangguan-gangguan Tidak Simetris

Karena setiap gangguan tidak simetris menyebabkan, mengalirnya arus tidak seimbang dalam sistem, metode komponen berguna sekali dalam analisis untuk menentukan arus dan tegangan di semua bagian sistem setelah terjadinya gangguan.

Tanpa memandang jenis gangguan yang terjadi pada terminal generator dan dengan menggunakan persamaan (3.25) sampai dengan (3.27), yang diturunkan dalam persamaan (3.8), maka bentuk matriks persamaan ini menjadi :

$$\begin{pmatrix} V_{aa1} \\ V_{bb1} \\ V_{cc1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Untuk setiap jenis gangguan persamaan (3.28) bersamaan dengan persamaan yang melukiskan pada gangguan tersebut, digunakan untuk menurunkan I_{a1} dengan E_a , Z_1 , Z_2 dan Z_0 sebagai suku-sukunya.

III.8. Gangguan Tunggal Dari Saluran Ke Tanah

Untuk mendapatkan besarnya arus gangguan tunggal dari fasa ke tanah, diambil dari diagram rangkaian pada generator terhubung Y yang tidak dibebani dengan netralnya ditanahkan melalui reaktansi seperti yang diperlihatkan dalam

gambar 5. dimana fasa a adalah tempat terjadinya gangguan. Persamaan yang akan dikembangkan untuk jenis gangguan ini akan berlaku hanya bila gangguannya adalah pada fasa a, tetapi hal ini tidak perlu menimbulkan kesulitan karena fasa tersebut telah dinamakan dengan sembarang saja dan setiap fasa dapat disebut sebagai fasa a. Keadaan pada gangguan dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0$$

Dengan $I_b=0$ dan $I_c = 0$ komponen simetris arus diberikan oleh :

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Sehingga I_{a0} , I_{a1} dan I_{a2} masing-masing sama dengan $I_a/3$ sehingga

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (3.30)$$

Dengan menggantikan I_{a2} dan I_{a0} dengan I_{a1} pada persamaan (3.29), kita dapatkan:

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

Dengan mengerjakan perkalian dan pengurangan matriks pada persamaan (3.31), dihasilkan suatu kesamaan matriks berkolom dua. Dengan mengalikan terlebih dahulu kedua matriks kolom dengan matriks $[1 \ 1 \ 1]$ diperoleh

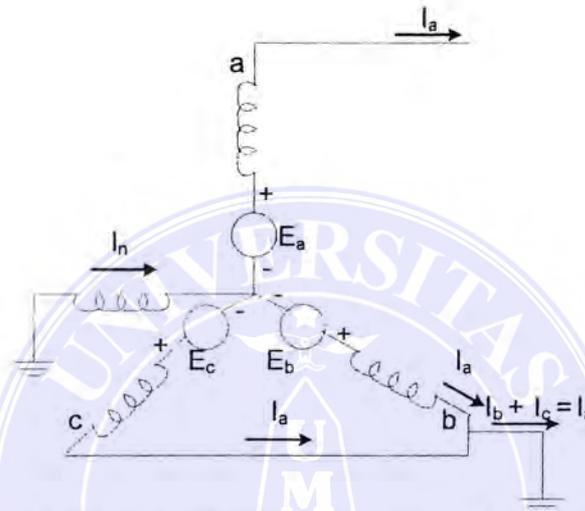
$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -I_{a1} \cdot Z_0 + E_a - I_{a1} \cdot Z_1 - I_{a1} \cdot Z_2 \quad (3.32)$$

Karena $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$, dan dengan menggunakan persamaan (3.32)

untuk I_{a1} diperoleh :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (3.33)$$

Persamaan (3.30) dan (3.33) adalah persamaan khusus untuk gangguan tunggal dari fasa ke tanah. Persamaan tersebut digunakan dengan persamaan (3.28) serta hubungan komponen simetris untuk menentukan semua tegangan dan arus pada titik gangguan.



Gambar 3.5. diagram rangkaian untuk gangguan tunggal dari fasa ke tanah pada fasa a pada terminal generator yang tidak dibebani yang netralnya ditanahkan melalui reaktansi.

Dalam Penurunan persamaan untuk komponen simetris bagi arus dan tegangan dalam satu jaringan pada sistem daya ketika terjadi gangguan, kita akan menetapkan bahwa I_a , I_b dan I_c adalah arus yang mengalir ke luar dari sistem seimbang yang asli pada gangguan, berturut-turut dari fasa a, b, dan c. Kita dapat membayangkan arus I_a , I_b dan I_c dengan berpedoman pada gambar 6 yang menunjukkan ketiga saluran sistem tiga fasa pada bagian jaringan dimana gangguan itu terjadi.

Tegangan dari fasa ke tanah pada gangguan itu dinamakan V_a , V_b dan V_c , sebelum terjadi gangguan tegangan dari fasa ke tanah fasa a pada titik gangguan dinamakan V_f , yang merupakan tegangan positif karena sistem itu dianggap seimbang.

Dengan cara yang sama arus gangguan fasa tunggal ke tanah pada sistem daya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$|I_a| = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \tag{3.34}$$

III.9. Gangguan Antar Dua Fasa

Diagram rangkaian untuk gangguan antar fasa pada generator terhubung Y yang tidak dibebani ditunjukkan dalam gambar 7 dengan gangguan pada fasa b dan c.

Keadaan pada gangguan tersebut dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

Dengan $V_b = V_c$ komponen-komponen simetris tegangan diberikan oleh

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Dari mana kita peroleh :

$$V_{a1} = V_{a2} \tag{3.35}$$

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Karena $I_b = -I_c$ dan $I_a = 0$, komponen simetris arus diberikan oleh :

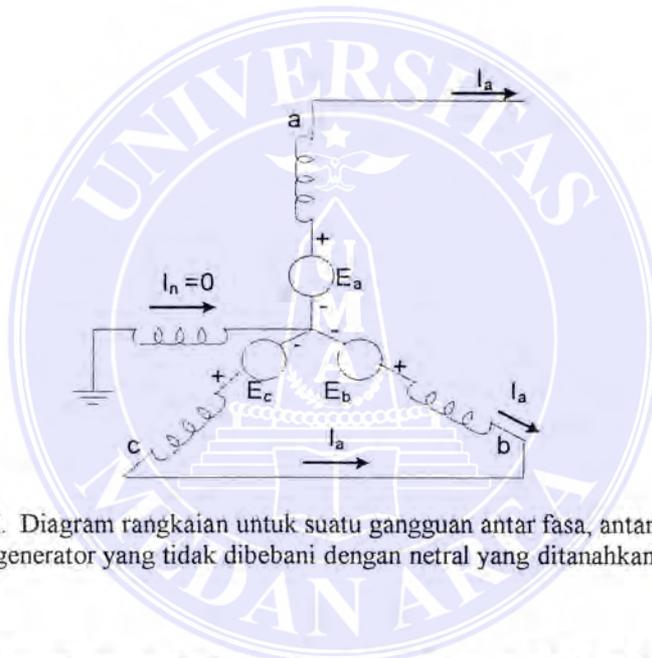
1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)19/9/23

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ -I_c \\ I_c \end{pmatrix} \tag{3.29}$$

Oleh karena itu,

$$I_{a0} = 0 \tag{3.36}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \tag{3.37}$$



Gambar 3.7. Diagram rangkaian untuk suatu gangguan antar fasa, antara fasa b dan c pada terminal generator yang tidak dibebani dengan netral yang ditanahkan melalui reaktor.

Dengan suatu sambungan dari netral generator ke tanah, Z_0 adalah terbatas (finite), sehingga :

$$V_{a0} = 0 \tag{3.38}$$

Karena I_{a0} adalah nol menurut persamaan (3.36).

Dengan penggantian menurut persamaan (3.35) sampai (3.38), persamaan (3.28)

menjadi,

$$\begin{pmatrix} V_{a1} \\ V_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_a \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \end{pmatrix} \tag{3.39}$$

Dengan menyelesaikan perkalian dan pengurangan matriks pada persamaan (3.39), dihasilkan suatu kesamaan matriks berkolom dua. Dengan mengalikan terlebih dahulu kedua matriks kolom dengan matriks $[1 \ 1 \ -1]$ diperoleh :

$$0 = E_a - I_{a1} \cdot Z_{11} - I_{a1} \cdot Z_2 \quad (3.40)$$

Dan penyelesaian untuk I_{a1} menghasilkan :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_{11} + Z_2} \quad (3.41)$$

Pada sistem daya untuk gangguan antar fasa, batang hipotesis pada ketiga. Pada gangguan tersebut terdapat hubungan berikut :

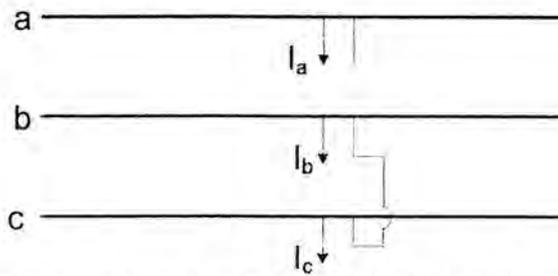
$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

Persamaan di atas bentuknya identik dengan persamaan yang dipakai untuk gangguan antar fasa pada generator terisolir. Bila kita menyelesaikan dengan cara persamaan (3.30) dengan persamaan (3.37) mengganti persamaan (3.28), menghasilkan :

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (3.42)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_{11} + Z_2} \quad (3.43)$$

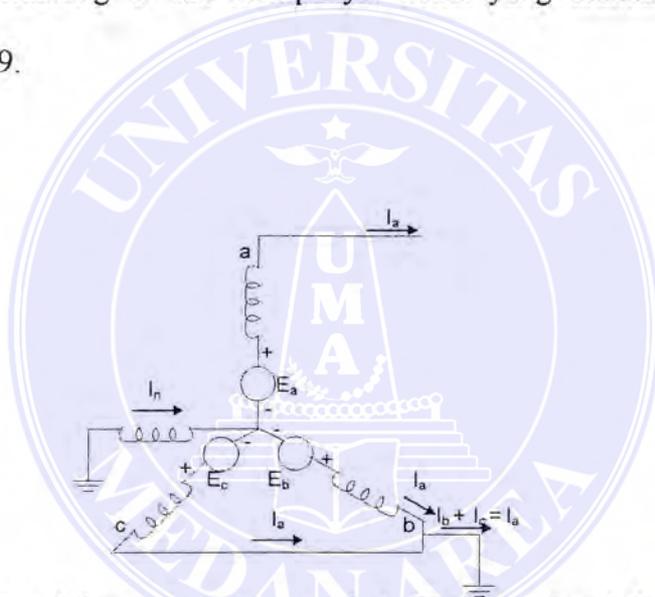
Persamaan (3.42) dan (3.43) menunjukkan bahwa jaringan urutan positif dan negatif harus dihubungkan secara paralel pada titik gangguan agar dapat menirukan gangguan antar fasa.



Gambar 3.8. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan antar fasa.

III.10 Gangguan Ganda Dari Fasa Ke Tanah

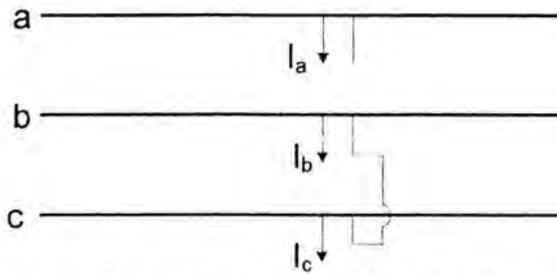
Diagram rangkaian untuk gangguan ganda dari fasa ke tanah pada generator tanpa beban yang terhubung Y dan mempunyai netral yang ditanahkan ditunjukkan dalam gambar 9.



Gambar 3.9 Rangkaian untuk gangguan ganda dari fasa ke tanah pada fasa b dan c dalam terminal generator tanpa beban yang netralnya ditanahkan.

Fasa yang mengalami gangguan adalah b dan c. Keadaan pada gangguan itu dinyatakan dengan persamaan berikut :

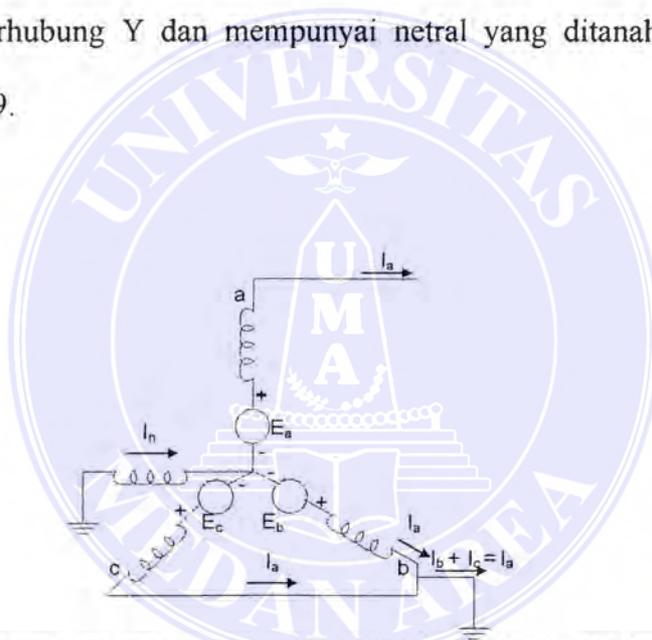
$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_c = -I_b$$



Gambar 3.8. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan antar fasa

III.10 Gangguan Ganda Dari Fasa Ke Tanah

Diagram rangkaian untuk gangguan ganda dari fasa ke tanah pada generator tanpa beban yang terhubung Y dan mempunyai netral yang ditanahkan ditunjukkan dalam gambar 9.



Gambar 3.9 Rangkaian untuk gangguan ganda dari fasa ke tanah pada fasa b dan c dalam terminal generator tanpa beban yang netralnya ditanahkan.

Fasa yang mengalami gangguan adalah b dan c. Keadaan pada gangguan itu dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_c = -I_b$$

Dengan $V_b = 0$ dan $V_c = 0$, komponen – komponen simetris tegangan diberikan oleh :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Oleh karena itu, V_{a0} , V_{a1} dan V_{a2} sama dengan $V_a/3$ dan

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (3.44)$$

Dengan menggantikan V_{a1} , V_{a2} dan V_{a0} dalam persamaan (3.28) dengan $E_a - I_{a1}.Z_1$, dan mengalikan kedua sisinya dengan Z^{-1} diperoleh :

$$Z^{-1} = \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

Diperoleh :

$$\begin{pmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_a - I_{a1}.Z_1 \\ E_a - I_{a1}.Z_1 \\ E_a - I_{a1}.Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

Dengan mengalikan kedua sisi persamaan (3.45) dengan matriks baris [1 1 1]

dan dengan mengingat kembali bahwa $I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = I_a = 0$ kita mempunyai :

$$\frac{E_a - I_{a1}.Z_1}{Z_0} + \frac{E_a - I_{a1}}{Z_1} + \frac{E_a - I_{a1}}{Z_2} = \frac{E_a}{Z_1}$$

Dan dengan menggabungkan suku-sukunya kita peroleh :

$$I_{a1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \frac{E_a (Z_2 + Z_0)}{Z_2 \cdot Z_0} \quad (3.47)$$

dan

$$I_{a1} = \frac{E_a (Z_2 + Z_0)}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 \cdot Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (3.48)$$

Pada sistem daya untuk gangguan ganda dari fasa ke tanah, kawat yang mengalami gangguan disambungkan seperti ditunjukkan dalam gambar 8.

Terdapat hubungan sebagai berikut pada titik gangguan :

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_a = 0$$

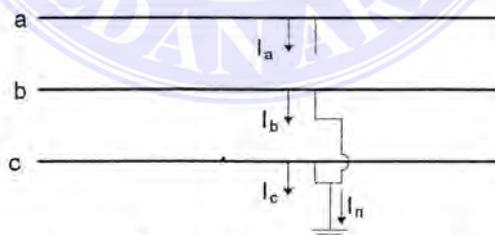
Dengan membandingkan dari penurunan yang dibuat pada bagian (3.31)

didapat :

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (3.49)$$

$$I_a = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 \cdot Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (3.50)$$

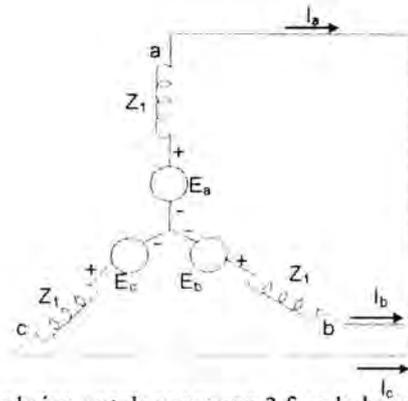
Persamaan (3.49) dan (3.50) menunjukkan bahwa ketiga jaringan urutan harus dihubungkan secara paralel pada titik gangguan untuk dapat mensimulasi gangguan dari fasa ke tanah.



Gambar 3.10. Diagram sambungan batang-batang hipotesis untuk suatu gangguan antar fasa ke tanah

III.11 Gangguan 3 Fasa Hubung Singkat Pada Generator Tanpa Beban

Diagram rangkaian untuk gangguan 3 fasa hubung singkat pada generator tanpa beban ditunjukkan dalam gambar di bawah ini.



Gambar 3.11 Rangkaian untuk gangguan 3 fasa hubung singkat pada generator tanpa beban.

Fasa yang mengalami gangguan adalah a, b dan c. Keadaan pada gangguan itu dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$V_a = V_b = V_c$$

Sehingga gangguan 3 fasa pada generator tidak berbeban adalah :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \tag{3.51}$$

Dengan cara yang sama pada sistem daya yang diperoleh :

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1} \tag{3.52}$$

BAB V

PENUTUP

V.1. Kesimpulan

Dari hasil analisa hubung singkat simetris yang telah dianalisis, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pemilihan kemampuan recloser untuk membuka saat sistem tenaga listrik mengalami gangguan ditentukan dengan perhitungan Short Circuit Capacity (SSC) agar pada saat gangguan terjadi recloser, saat mengisolir gangguan recloser memiliki kemampuan terhadap arus gangguan yang besar dari kerusakan.
2. Arus Hubung singkat yang terjadi pada bus 5 disisi tegangan tinggi dari distribusi adalah 1.9987 kA

Dan besar kapasitas recloser untuk menanggung arus gangguan tersebut sebelum gangguan di isolir adalah: $519,262260 \text{ MVA}$

V.2. Saran

Data Hasil Analisis SSC digunakan sebagai sebagai awal untuk penelitian lanjutan skripsi seperti penentuan arus arus gangguan untuk setting Over Current Relay (OCR)

Daftar Pustaka

1. A. Chaly, K. Gutnik, A. Testodov dkk “ Autcoordination OF Protection Setting Off Series Recloser, Artikel, 2005
2. Djiteng Marsudi “Operasi Sistem Tenaga Listrik” Yogyakarta Penerbit Graha Ilmu 2006
3. H.F Wang “A Unified Model for the Analysis of FACTS devices in Damping Power Oscilations-PART I : Single Machnie Infinite Bus Powers Systems,” IEEE Transaction On Power Delivery, Vol 12 No. 2 pp 941-946, April 1997
4. Kundur P. “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994
5. Moh. E El Hawary “Electrical Power System “ IEEE Press. 1983
6. Padiyar, K.R., 1996, *Power System Dynamis Stability and Control*, pp. 191 – 268, John Wiley & Sons , Singapore.
7. Rukmi Sari Hartati, I Wayan Sukerayasa, “Penerapan Metode Pendekatan Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi” Paper teknik Elektro Udayana, Vol 9 No 1 Januari-Juni 2010
8. Stevenson, W.D., dan Idris, K., 1990, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, pp. 349-351, Erlangga, Jakarta.
9. Williem D. Stevenson, Jr, “Analisis Sistem Tenaga Listrik” Edisi Keempat, Penerbit Erlangga 1990

ANALISA KOORDINASI OCR - RECLOSER PENYULANG KALIWUNGU 03

Nugroho Agus Darmanto, Susatyo Handoko
nugroho@elektro.ft.undip.ac.id, susatyo@elektro.ft.undip.ac.id
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik., Universitas Diponegoro

Abstrak

Kelistrikan di Jawa Tengah menganut sistem pentanahan langsung sepanjang jaringan (solidly grounded common neutral), sehingga arus gangguan yang terjadi sangat besar, maka perluasan atau pelimpahan beban dari penyulang lain harus mempertimbangkan jangkauan pengindera peralatan pengaman dan mengkoordinasikan antara pengaman yang satu dengan yang lain, koordinasi system proteksi berperan sangat penting untuk menjamin keandalan sistem penyaluran tenaga listrik.

Dengan menganalisa besar arus gangguan yang dapat terjadi dan memperhatikan karakteristik serta pola setting peralatan pengaman terpasang, diharapkan dapat diketahui tingkat keandalan penyulang Kaliwungu 03 (KLU03) dalam kondisi normal atau saat menerima pelimpahan beban dari penyulang Weleri 06 (WLI06).

Dari analisa diketahui bahwa dengan besar arus gangguan minimum yang terjadi masih lebih besar dibanding dengan setting OCR dan Recloser, maka dapat disimpulkan peralatan pengaman penyulang Kaliwungu 03 dapat mengakomodir pelimpahan beban dari penyulang Weleri 06, namun untuk keandalan perlu dievaluasi kembali setting OCR dan Recloser khususnya tentang pemilihan karakteristik dan konstanta waktu tunda.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik wilayah kota Kendal disuplai dari GI. (Gardu Induk) Kaliwungu Trafo I penyulang Kaliwungu 03 (KLU03) dan dari GI. Weleri Trafo II penyulang Weleri 06 (WLR06), yang mana dalam kondisi operasi normal kedua penyulang tersebut dipisahkan oleh ABSW (Air Break Switch) pada posisi buka/NO (Normaly Open). Titik posisi NO tidak selalu pada ABSW tertentu saja, namun bisa dipindah ke ABSW lain yang sebelumnya pada posisi tutup/NC (Normaly Close) yang berada pada batas pembagi / seksi atau zone, pemindahan titik ABSW NO ini dengan mempertimbangkan regulasi beban antara kedua penyulang yang disesuaikan dengan kemampuan / kapasitas dari masing-masing penyulang.

Pada kondisi tertentu untuk keperluan pemeliharaan atau perbaikan peralatan disuatu seksi diperlukan manuver (pelimpahan) beban dari

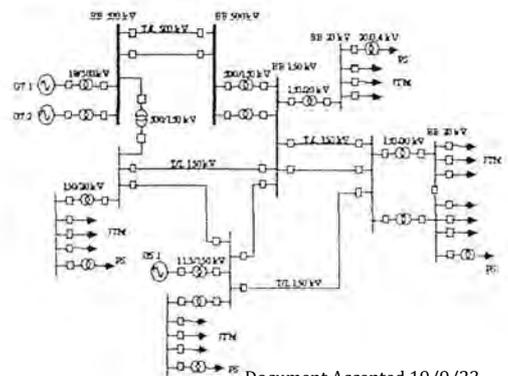
penyulang satu ke penyulang yang lainnya, untuk meminimalkan daerah padam. Kondisi yang sifatnya hanya sementara ini tetap harus diperhitungkan koordinasi pengamanannya, sehingga apabila terjadi gangguan dimanapun titiknya, kinerja pengaman jaringan akan tetap memenuhi

Tujuan penyusunan makalah ini adalah untuk menyajikan analisa teknis keandalan kelistrikan penyulang Kaliwungu 3 (KLU03) dari gardu induk Kaliwungu, yang dalam kondisi normal melayani wilayah kota Kendal secara radial, dan dalam kondisi tertentu (manuver beban bersifat sementara) harus memikul beban dari penyulang Weleri 6 (WLR06), maka diperlukan pembahasan koordinasi peralatan pengaman, sehingga keandalan sistem penyaluran tenaga listrik dapat lebih terjamin secara optimal dengan tetap berpedoman pada desain kriteria dari masing-masing peralatan.

II. SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

2.1. Sistem Kelistrikan di Jawa Tengah

Karena berbagai persoalan teknis, tenaga listrik hanya dibangkitkan pada tempat-tempat tertentu. Sedangkan pelanggan tenaga listrik tersebar di berbagai tempat, maka penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkan sampai ke tempat pelanggan memerlukan jaringan. Tenaga listrik dibangkitkan dari PLTA, PLTU, PLTG, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) yang ada di Pusat Listrik. Hal ini digambarkan oleh Gambar 2.1.



Document Accepted 19/9/23

Gambar 1 Skema Sistem Tenaga Listrik

2.2. Struktur Jaringan Tegangan Menengah.

Struktur jaringan tegangan menengah yang ada bila dikelompokkan terdiri dari lima model, yaitu :

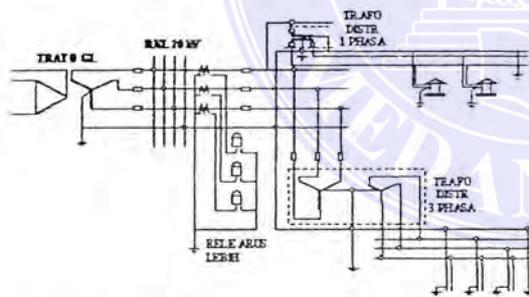
- a. Jaringan radial.
- b. Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*).
- c. Jaringan lingkaran (*loop*).
- d. Jaringan Spindel
- e. Sistem gugus atau sistem kluster.

II.3. Sistem Pentanahan Jaringan Distribusi di Indonesia

Pentanahan titik netral sistem adalah hubungan titik netral dengan tanah, baik langsung maupun melalui tahanan reaktansi ataupun kumparan Petersen. Di Indonesia sistem pentanahan meliputi empat macam, yaitu :

- a. Pentanahan mengambang (tidak ditanahkan).
- b. Pentanahan dengan tahanan.
- c. Pentanahan dengan kumparan Petersen.
- d. Pentanahan langsung (*Solid*)

Sistem kelistrikan pada PLN Distribusi Jawa Tengah adalah menggunakan tiga fasa empat kawat dengan pentanahan netral secara langsung atau sesuai SPLN 12 : 1978 (Pola 2)



Gambar 2 Sistem pentanahan langsung 3 fasa 4 kawat

Pada sistem ini (pola 2) mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

- a. Sistem jaringan :
 - Tegangan nominal 20 kV (antar fasa)
 - Sistem pentanahan dengan netral ditanahkan langsung sepanjang jaringan.
 - Kawat netral dipakai bersama untuk saluran tegangan menengah dan saluran tegangan rendah dibawahnya.

- Konstruksi jaringan terdiri dari saluran udara terutama dan saluran kabel, sedang saluran udara terdiri dari :

Saluran utama terdiri dari kawat fasa 3 x AAAC 240 mm² dan kawat netral 1 x 120 mm²

Saluran cabang terdiri dari jaringan 3 fasa atau 1 fasa (2 kawat, untuk fasa & netral) dengan ukuran disesuaikan dengan perencanaan beban.

- Sistem pelayanan radial dengan kemungkinan antara saluran utama yang berbeda penyulang dapat saling dihubungkan dalam keadaan darurat.
- Pelayanan beban dapat dilayani dengan :
 - Tiga fasa, 4 kawat dengan tegangan 20 kV antar fasa , dan
 - Fasa tunggal, 2 kawat dengan tegangan 20/√3 kV

b. Sistem Pengamanan

Sistem pengamanan jaringan dilakukan dengan perencanaan koordinasi sebagai berikut :

- Pemutus Tenaga (PMT), dengan pengindera OCR dab GRF.
- Recloser, dengan pengindera OCR (*Over Current Relay*).
- Sectionaliser, dengan pengindera jumlah tegangan hilang / CTO (*Count To Open*)
- FCO, dengan fuse pelebur untuk pemutus rangkaian akibat hubung singkat karena gangguan atau beban lebih.

c. Keistimewaan dari sistem 3 fasa 4 kawat.

Sistem ini pendekatannya didasari dari jarak antara beban relatif jauh dan kepadatan beban rendah. Sistem ini juga lebih sesuai untuk daerah yang tahanan spesifik tanahnya relatif tinggi.

Pada sistem ini kawat netral diusahakan sebanyak mungkin dan merata ditanahkan. kawat netral JTM dan JTR dihubungkan dan dipakai bersama, dimana pentanahannya dilakukan sepanjang JTM, JTR dan dihubungkan pula pada pentanahan TR dari tiap instalasi konsumen.

Sistem pelayanan JTM terutama menggunakan jaringan 1 fasa yang terdiri dari kawat fasa dan netral, sehingga

memungkinkan penggunaan trafo-trafo kecil 1 fasa yang sesuai bagi beban-beban kecil yang berjauhan letaknya.

Dengan adanya tahanan netral yang sangat kecil mendekati nol, maka arus hubung tanah menjadi relatif besar dan berbanding terbalik dengan letak gangguan tanah sehingga perlu dan dapat digunakan alat pengaman yang dapat bekerja cepat dan dapat memanfaatkan alat pengindera (relay) dengan karakteristik waktu terbalik (invers time).

Keuntungan lain dari arus gangguan fasa tanah yang besar adalah dapat dilakukannya koordinasi antara PMT dan relay arus lebih atau recloser dengan pengaman lebur atau antara recloser dengan automatic sectionalizer secara baik.

Pada percabangan beban atau tapping 1 fasa dapat digunakan pengaman fasa tunggal yang lebih selectif.

2.4. Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan system penyaluran distribusi tenaga listrik tergantung pada model susunan saluran, pengaturan operasi dan pemeliharaan serta koordinasi peralatan pengaman. Tingkat kontinuitas dibagi antara lain :

- Tingkat 1 : padam berjam-jam
- Tingkat 2 : padam beberapa jam
- Tingkat 3 : padam beberapa menit
- Tingkat 4 : padam beberapa detik
- Tingkat 5 : tanpa padam

Keandalan dari suatu sistem adalah kebalikan dari besarnya jam pemutusan pelayanan, jam pemutusan pelayanan dapat dihitung berdasarkan jumlah konsumen atau jumlah daya yang padam (diputus)

$$\begin{aligned} \text{Jam pemutusan pelayanan} &= \frac{\{ h(\text{jam}) \times a(\text{konsumen}) \}}{n(\text{konsumen sistem}) \times 1 \text{ tahun}} \\ &= \frac{(h \times a)/n \text{ jam/tahun}}{n} = \Sigma a \\ \text{Jam pemutusan pelayanan} &= \frac{h(\text{jam}) \times b(\text{kW})}{m(\text{kW}) \times 1 \text{ tahun}} \\ &= \frac{(h \times b)/m \text{ jam/tahun}}{m} = \Sigma b \end{aligned}$$

2.5. Macam-macam gangguan dan akibatnya

- a. Gangguan beban lebih.
- b. Gangguan hubung singkat.
- c. Gangguan tegangan lebih
- d. Gangguan akibatnya Pembangkit

e. Gangguan Instability

2.6. Cara mengatasi gangguan

- a. Mengurangi terjadinya gangguan
- b. Mengurangi akibat gangguan

2.7. Impedansi Jaringan Distribusi

Pada sistem distribusi tenaga listrik impedansi yang menentukan besarnya arus hubung singkat, adalah :

- Impedansi sumber
- Impedansi transformator tenaga
- Impedansi hantaran/jaringan
- Impedansi gangguan atau titik hubung singkat

2.8. Komponen Simetris.

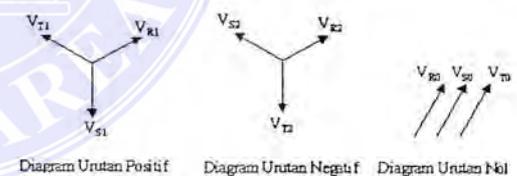
Komponen simetris lazim digunakan dalam menganalisa gangguan-gangguan yang tidak simetris didalam suatu sistim kelistrikan.

a. Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa

Ketiga sistem simetris yang merupakan hasil uraian komponen simetris dikenal dengan nama :

- Komponen urutan positif
- Komponen urutan negatif
- Komponen urutan nol

Dari komponen vektor yang tidak seimbang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen simetris

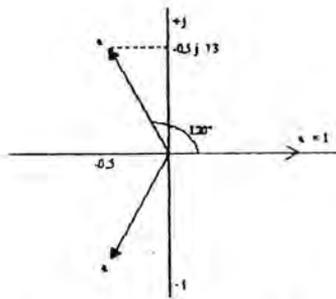


Gambar 3 Diagram komponen simetris

b. Operator Vektor "a"

Pada penggunaan komponen simetris sistem 3 fasa memerlukan suatu fasor atau operator yang akan memutar rotasi dengan vektor lainnya yang berbeda sudut 120°. Operator yang dipakai vektor satuan adalah "a". Didefinisikan bahwa :

$$a = -\frac{1}{2} + \frac{j}{2}\sqrt{3} = \angle 120^\circ = j120$$



Gambar 4 Vektor scalar " a "

2.9. Teori Hubung Singkat

a. Arus hubung singkat 3 fasa

$$I_{hs\ 3\phi} = \frac{E}{Z_1}$$

b. Arus hubung singkat 2 fasa

$$I_{hs\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3} E}{Z_1 + Z_2}$$

c. Arus hubung singkat 1 fasa

$$I_{hs\ 1\phi} = \frac{3 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Dimana, $Z_1 \approx Z_2$ maka

maka, dapat dihitung

$$I_{hs\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3} E}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3} E}{2 Z_1} = 0,866 I_{hs\ 3\phi}$$

Gangguan 1 fasa ke tanah dekat GI : $Z_1 = Z_2 = Z_0$

$$I_{hs\ 1\phi} = \frac{3 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{3 E}{3 Z_1} = I_{hs\ 3\phi}$$

Gangguan 1 fasa ke tanah jauh dari GI : $Z_0 = 3 Z_1, Z_1 = Z_2$

$$I_{hs\ 1\phi} = \frac{3 E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{3 E}{5 Z_1} = 0,6 I_{hs\ 3\phi}$$

III. SISTEM PENGAMAN PADA SUTM 20 kV 3 FASA 4 KAWAT

3.1. Pemutus Tenaga

Pemutus Tenaga (PMT) adalah alat pemutus otomatis yang mampu memutus/menutup rangkaian pada semua kondisi, yaitu pada kondisi normal ataupun gangguan.

Secara singkat tugas pokok pemutus tenaga adalah :

- Keadaan normal, membuka / menutup rangkaian listrik.
- Keadaan tidak normal, dengan bantuan relay, PMT dapat membuka sehingga gangguan dapat dihilangkan.

3.2. Relay Arus Lebih (OCR)

Relay arus lebih adalah relay yang bekerja terhadap arus lebih, ia akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai settingnya (I_{set}).

a. Prinsip Kerja

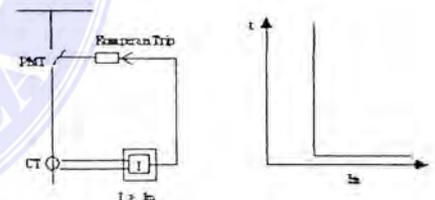
Pada dasarnya relay arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus. Harga atau besaran yang boleh melewatinya disebut dengan setting.

Macam-macam karakteristik relay arus lebih :

- Relay waktu seketika (Instantaneous relay)
- Relay arus lebih waktu tertentu (Definite time relay)
- Relay arus lebih waktu terbalik

b. Relay Waktu Seketika (Instantaneous relay)

Relay yang bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya, relay akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 - 20 ms). Dapat kita lihat pada gambar 5. dibawah ini.

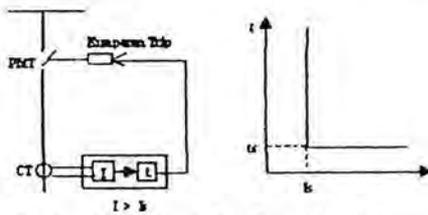


Gambar 5 Karakteristik relay waktu seketika

Relay ini jarang berdiri sendiri tetapi umumnya dikombinasikan dengan relay arus lebih dengan karakteristik yang lain.

c. Relay arus lebih waktu tertentu (definite time relay)

Relay ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja relay mulai pick up sampai kerja relay diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan relay, lihat gambar 6. dibawah ini.

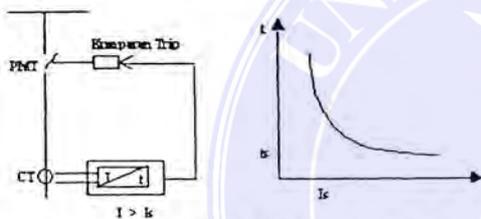


Gambar 6 Karakteristik relay waktu definite

d. Relay arus lebih waktu terbalik.

Relay ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (inverse time), makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik ini bermacam-macam. Setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik waktunya dibedakan dalam tiga kelompok :

- Standar invers
- Very inverse
- extremely inverse



Gambar 7 Karakteristik relay waktu Inverse

Pada relay arus lebih memiliki 2 jenis pengamanan yang berbeda antara lain:

- Pengamanan hubung singkat fasa
Relay mendeteksi arus fasa. Oleh karena itu, disebut pula “Relay fasa”. Karena pada relay tersebut dialiri oleh arus fasa, maka settingnya (I_s) harus lebih besar dari arus beban maksimum. Ditetapkan $I_s = 1,2 \times I_n$ (I_n = arus nominal peralatan terlemah).
- Pengamanan hubung tanah
Arus gangguan satu fasa tanah ada kemungkinan lebih kecil dari arus beban, ini disebabkan karena salah satu atau dari kedua hal berikut:

Gangguan tanah ini melalui tahanan gangguan yang masih cukup tinggi.

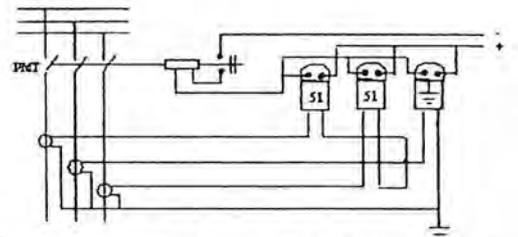
Pentanahan netral sistemnya melalui impedansi/tahanan yang tinggi, atau bahkan tidak ditanahkan

Dalam hal demikian, relay pegaman hubung singkat (relay fasa) tidak dapat mendeteksi gangguan tanah tersebut. Supaya relay sensitive

kawat fasa melainkan kawat netral pada sekunder trafo arusnya.

Dengan demikian relay ini dialiri oleh arus netralnya, berdasarkan komponen simetrisnya arus netral adalah jumlah dari arus ketiga fasanya.

Arus urutan nol dirangkaian primernya baru dapat mengalir jika terdapat jalan kembali melalui tanah (melalui kawat netral)



Gambar 8 Sambungan relay GFR dan 2 OCR

3.3. Pemutus Balik Otomatis (Recloser)

Pemutus balik otomatis (*Automatic circuit recloser = Recloser*) ini secara fisik mempunyai kemampuan seperti pemutus beban, yang dapat bekerja secara otomatis untuk mengamankan sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan hubung singkat.

3.4. Saklar seksi Otomatis (sectionaliser)

Sectionaliser adalah alat perlindungan terhadap arus lebih, hanya dipasang bersama-sama dengan PBO yang berfungsi sebagai pengaman back-upnya. Alat ini menghitung jumlah operasi pemutusan yang dilakukan oleh perlindungan back-upnya secara otomatis disisi hulu dan SSO ini membuka pada saat peralatan pengaman disisi hulunya sedang dalam posisi terbuka.

3.5. Pelebur (fuse cut out)

Adalah suatu alat pemutus, dimana dengan meleburnya bagian dari komponen yang telah dirancang khusus dan disesuaikan ukurannya untuk membuka rangkaian dimana pelebur tersebut dipasang dan memutuskan arus bila arus tersebut melebihi suatu nilai dalam waktu tertentu. Oleh karena pelebur ditujukan untuk menghilangkan gangguan permanen, maka pelebur dirancang meleleh pada waktu tertentu pada nilai arus gangguan tertentu.

3.6. Koordinasi Peralatan Pengaman SUTM 20 kV

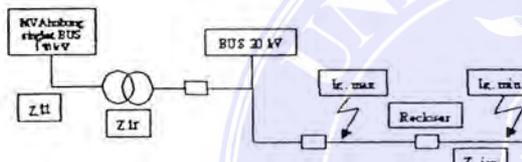
Pada dasarnya prinsip pokok dari koordinasi adalah :

- Peralatan pengaman pada sisi beban harus dapat menghilangkan gangguan menetap atau sementara yang terjadi pada saluran, sebelum peralatan pengaman di sisi sumber beroperasi memutuskan saluran sesaat atau membuka terus.
- Pemadaman yang terjadi akibat adanya gangguan menetap harus dibatasi sampai pada seksi sekecil mungkin.

IV. PERHITUNGAN ARUS GANGGUAN DAN ANALISIS KOORDINASI PERALATAN PENGAMAN

4.1. Data-data Perusahaan :

$I_{hs\ 3\Phi\ tr}$: 17.856,96 Ampere
 Kapasitas trf : 60 MVA
 Impedansi Trafo : 12,5 %
 Impedansi JTM 3 Φ : $Z_1 = Z_2 = 0,134 + j0,308$
 $Z_0 = 0,413 + j0,949$
 Impedansi JTM 1 fasa : $Z_{1\phi} = 1,623 + j0,746$



Gambar 9 Diagram Komponen Arus Gangguan

4.2. Perhitungan dan analisis

Impedansi trafo :

$$Z_{tr} = \frac{kV_2^2}{MVA_{tr}} \cdot 12,5\% = \frac{20^2}{60} = 0,833 \text{ Ohm}$$

Menghitung MVA_{hs tr} bila diketahui $I_{hs\ 3\Phi\ tr}$

$$MVA_{hs\ tr} = I_{hs\ 3\Phi\ tr} Z_{tr} \sqrt{3} \text{ kV}_1 / 10^3$$

$$MVA_{hs\ tr} = 17.856,96 \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 0,8333 / 10^3 = 3866,15 \text{ MVA}$$

$$\text{Impedansi sisi TT } (Z_{tt}) = \frac{kV_2^2}{MVA_{tr}} = \frac{20^2}{3.865,87} = 0,1035 \text{ Ohm}$$

Arus gangguan maximum adalah yang terjadi pada dekat rel 20 kV GI.

$$I_{hs\ max\ 3\phi} = \frac{kV_{zn}}{Z_{tt} + Z_{tr}} = \frac{11.547}{(0,8333 + 0,1035)} = 12.326,07 \text{ Amp}$$

$$I_{hs\ 2F\ Max} = \frac{\sqrt{3} \text{ kV}_{zn}}{2(Z_{tr} + Z_{tr})} = 10.686,70 \text{ Amp}$$

$$I_{hs\ 1F-n\ Max} = \frac{3 \text{ kV}_{zn}}{(Z_{tr} + Z_{tr})} = I_{hs\ 3F\ TM} = 12.326,07 \text{ Amp}$$

Arus gangguan yang terjadi pada ujung jaringan SUTM (JTM) adalah merupakan arus hubung singkat minimum, rumus perhitungan sebagai berikut :

$$I_{hs\ 3F\ Min} = \frac{kV_{zn}}{(Z_{tr} + Z_{tr} + Z_1)}$$

$$I_{hs\ 2F\ Min} = \frac{\sqrt{3} \text{ kV}_{zn}}{(Z_{tt} + Z_{tr} + Z_1 + Z_2)}$$

$$I_{hs\ 1F-n\ Min} = \frac{3 \text{ kV}_{zn}}{(Z_{tt} + Z_{tr} + Z_1 + Z_2 + Z_0)}$$

4.3. Setting arus OCR

Peralatan dengan arus nominal terendah adalah CT, dengan $I_n = 400$ Ampere.

$$I_{s\ ocr} = 1,2 \times I_n \text{ CT} = 480 \text{ Ampere}$$

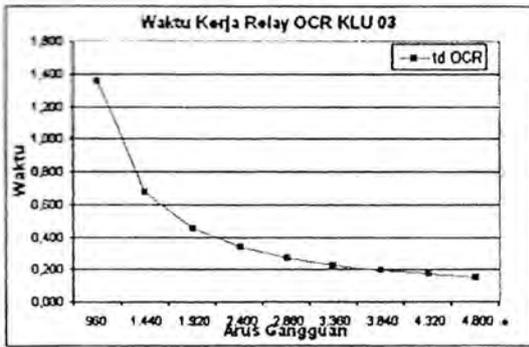
Setting waktu tunda relay OCR untuk penyulang dipilih karakteristik *Very Inverse*, dengan rumus

$$t_{d\ vi} = k \cdot \beta / ((I_{hs} / I_{s\ ocr})^\alpha - 1)$$

dimana : (k) = 0,1 β = 13,5 dan α = 1.

Tabel 1 Perhitungan waktu tunda OCR

$X I_{s\ ocr}$	I_{hs}	t_d (detik)
100%	480	
100% +1	481	648,000
200%	960	1,350
300%	1.440	0,675
400%	1.920	0,450
500%	2.400	0,338
600%	2.880	0,270
700%	3.360	0,225
800%	3.840	0,193
900%	4.320	0,169
1000%	4.800	0,150
$I_{hs\ max}$	12.326	0,055



Gambar 10 Kurva OCR Inverse

4.4. Setting GFR

Setting GFR pada penyulang : $0,5 \times I_n \text{ CT}$
: 200 Ampere

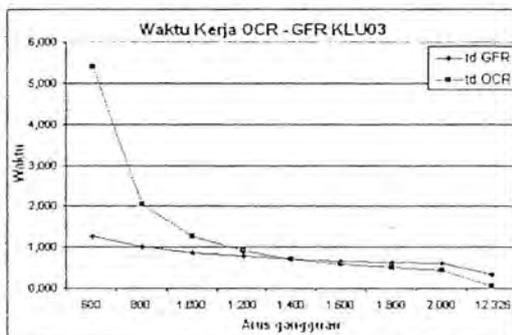
Setting waktu tunda relay GFR dipilih karakteristik *Standar Inverse*, dengan rumus waktu tunda, berikut :

$$td_{si} = k \cdot \beta / ((I_{hs} / I_{s \text{ OCR}})^{\alpha} - 1)$$

Tabel 2 Perhitungan waktu tunda OCR dan GFR

$\times I_{s \text{ GFR}}$	I_{hs}	$t_{d \text{ GFR}}$ (detik)	$t_{d \text{ OCR}}$ (detik)
100%	200		
100% +1	201		
200%	400	2,006	
300%	600	1,260	5,400
400%	800	0,996	2,025
500%	1.000	0,856	1,246
600%	1.200	0,767	0,900
700%	1.400	0,706	0,704
800%	1.600	0,659	0,579
900%	1.800	0,623	0,491
1000%	2.000	0,594	0,426
$I_{hs \text{ max}}$	12.326	0,326	0,055

Relay GFR juga dikombinasi dengan setting waktu tunda definite (waktu tunda tertentu), yang mana pemilihannya ditetapkan 1 detik.



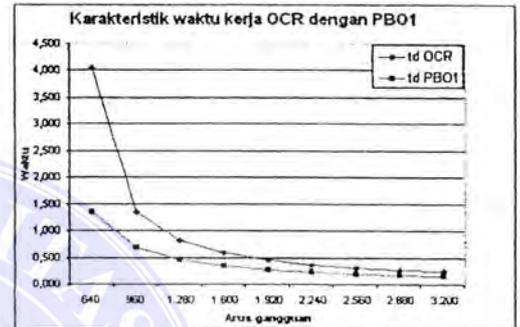
Gambar 11 Waktu kerja OCR dan GFR

Setting arus momen (I_m) yang akan bekerja tanpa tunda waktu, penetapannya sebagai berikut :

- Setting arus momen OCR = $400 \% \times I_n$ terendah
- Setting arus momen GFR = $600 \% \times I_n$ terendah

4.6. Koordinasi OCR dengan PBO1

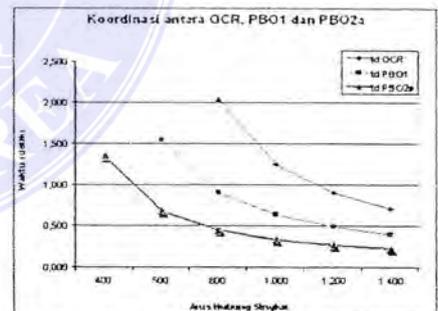
Dengan beban tertinggi pada PBO1 sebesar 250 ampere, maka ditetapkan I_{set} PBO1 adalah 320 Ampere



Gambar 12 Karakteristik waktu kerja OCR dan PBO1

4.7. Koordinasi OCR, PBO 1 dan PBO 2a

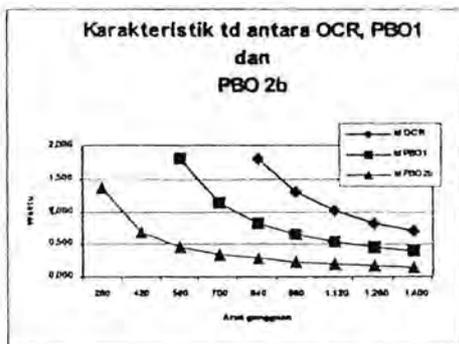
Beban tertinggi pada PBO 2a adalah sebesar 88 Ampere, maka setting arus pada PBO 2a ditetapkan 200 Ampere



Gambar 13 Koordinasi OCR, PBO1, dan PBO2a

4.8. Koordinasi OCR, PBO 1 dan PBO 2b

Beban tertinggi pada PBO 2a adalah sebesar 40 Ampere, maka setting arus pada PBO 2a ditetapkan 140 Ampere



Gambar 14 Karakteristik td OCR, PBO1, dan PBO2b

4. Pribadi Kadarisman Ir., Pengaman Arus lebih, Udiklat Teknologi Kelistrikan.
5. SPLN 64 : 1985, Petunjuk pemilihan dan penggunaan pelebur pada sistem distribusi tegangan menengah.
6. SPLN 52 - 3 : 1983, Pola pengaman sistem
7. Soemarto Soedirman Ir., Pembumian dan proteksi sistem distribusi, Udiklat Teknologi Kelistrikan.
8. Sunil S. Rao, Switchgear and protection, Khanna Publishers, Delhi, 1978.

V. KESIMPULAN

1. Besar arus gangguan pada sistem 3 fasa 4 kawat memberikan keuntungan koordinasi antara peralatan pengaman yang satu dengan yang lain dengan baik.
2. Perbedaan mendasar dari perhitungan arus gangguan maksimum dengan minimum adalah besar impedansi jaringan Z_1 , Z_2 dan Z_0 , dimana pada arus gangguan maksimum yang terjadi dekat gardu induk, nilai impedansi jaringan mendekati nol, dan pada arus gangguan minimum nilai impedansi jaringan sesuai nilai impedansi pada titik lokasi gangguan ($\neq 0$). Rumus perhitungan yang digunakan untuk kedua kondisi pada dasarnya sama.
3. Jangkauan relay sangat dipengaruhi besar kecilnya arus hubung singkat, sedangkan besar arus hubung singkat dipengaruhi :
 - a. Jumlah pembangkit yang masuk ke sistem jaringan.
 - b. Kapasitas dan impedansi trafo
 - c. Titik gangguan atau panjang jaringan.
4. Peralatan Pengaman pada penyulang KLU-03 masih bisa menjangkau (melakukan penginderaan) pada saat menerima pelimpahan beban dari penyulang WLI-06.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hadi Saadat, Power system analysis, WCB McGraw Hill, 1999.
2. IEEE Power Engineering Society, Application and coordination of recloser, sectionalizer and fuse, New York, 1980.
3. Komari Ir., Pembumian titik netral, PT PLN (Persero), Udiklat Teknologi Kelistrikan.

Modeling of Wind Power Plants for Short Circuit Analysis in the Transmission Network

Nader Samaan, *Member, IEEE*, Robert Zavadil, *Member, IEEE*, J. Charles Smith, *Senior Member, IEEE*, and Jose Conto, *Member, IEEE*

Abstract-- This paper presents guidelines for estimating short-circuit contribution from wind power plants to the transmission network. Only squirrel-cage induction generator based turbines have been considered. A commercial software package has been used to model the plant in detail. Transient analysis is performed to explore the nature of the plant short-circuit current. AC symmetrical short-circuit currents are calculated and used through a network reduction technique to obtain the equivalent positive and zero sequence impedances for the wind power plant. Case studies have been performed on a sample 50 MW wind power plant. The plant contribution during the initial cycle of the fault (asymmetrical current) can be as high as 6 or more times the rated turbine current. As the fault persists, the contribution decreases in magnitude. Comparison shows that the equivalent circuit gives identical results to the detailed model. The equivalent circuit can be used to represent the wind power plant in short-circuit analysis at the transmission level.

Index Terms— Equivalent circuits, induction generator, short circuit currents, wind power generation.

I. INTRODUCTION

TECHNICAL and economic impacts for integrating significant amount of wind power are becoming challenging tasks for many utilities. The state-of-the-art for such studies was introduced recently in [1]. One of these technical impacts is the change in short-circuit levels and the need to change the settings of protecting relays.

With the rapid increase in large wind power plants connected to the MV/HV transmission networks, it is vital to provide protection engineers with the needed procedures to calculate accurately the contribution of a newly installed Wind Power Plant (WPP) to short-circuit currents in the transmission network. There is a need in the industry for characterization of different wind turbine topologies with regard to short-circuit behavior. Available short-circuit current calculation standards [2], [3] give the guidelines in dealing with industrial induction motors. The standards do not give direct guidelines in dealing with large induction generators used in wind turbines. As the input mechanical power to the induction genera-

tor is almost constant after the fault, the short circuit current of the turbine induction generator will decay in a different manner than induction motors.

The objective of this paper is to develop guidelines for estimating the short-circuit current contribution from a WPP with squirrel-cage induction generator (Type A) based wind turbines. A detailed WPP model together with a generic dynamic model of the wind turbine was built using the commercial software package "PowerFactory" version 13 [4]. This software provides steady state solution for load flow and short-circuit calculations and time domain analysis for transient simulation.

The turbine generic dynamic model has been used to perform transient analysis during fault conditions. The objective of such analysis is to have an idea about peak values and the decay of the WPP short-circuit current due to faults at the plant main substation. If calculated, peak asymmetrical short-circuit current values can be used in specifying the circuit breaker momentary duty.

The detailed WPP model has been used to perform short-circuit analysis to calculate the symmetrical short-circuit current injected from the wind plant when a fault occurs at the plant main substation without having a short-circuit current contribution from any other source. These currents are used through a network reduction technique to obtain an equivalent circuit for the WPP. This equivalent circuit can be used to represent the WPP in future short-circuit calculations in the transmission network. The calculations are used in specifying the circuit breaker interrupting duty at 1.5 - 4 cycles after the fault occurrence.

Case studies have been performed on a 50 MW sample WPP. Results from transient simulation give detailed waveforms for the short-circuit current before, during and after different types of faults. Steady state short-circuit calculations have been performed. Calculated short-circuit currents have then been used to calculate the equivalent positive sequence and zero sequence impedances of the WPP. The validity of using the equivalent circuit has been shown by comparing short circuit calculations using the detailed model and the equivalent circuit for the WPP.

The expected behavior of the other three major wind turbine topologies is explained briefly at the end of the paper.

This work was supported financially by the Electric Reliability Counsel of Texas (ERCOT) and the Utility Wind Integration Group (UWIG.)

Nader Samaan and Robert Zavadil are with EnerNex Corp., Knoxville, Tennessee 37922 USA (e-mail: nader@enernex.com and bob@enernex.com).

J. Charles Smith is with the Utility Wind Integration Group, Reston, Virginia 20195 USA (e-mail: jcharlessmith@comcast.net).

Jose Conto is with Electric Reliability Counsel of Texas (ERCOT), Taylor, Texas 77883 USA (e-mail: jcont@ercot.com).

UNIVERSITAS MEDAN AREA

II. MODELING OF THE WIND TURBINE FOR TRANSIENT ANALYSIS DURING FAULT CONDITIONS

A generic dynamic model for the wind turbine has been built to perform transient analysis to get a clear idea about the nature of the WPP short-circuit current waveforms for different fault types. A squirrel-cage induction generator based wind turbine is usually termed a Type A wind turbine. The wind turbine dynamic model consists basically of four blocks which are the pitch angle controller, the turbine, the drive-train shaft using a two-mass model, and the squirrel-cage induction generator. The turbine dynamic block diagram is shown in Fig. 1.

The "PowerFactory" built-in one-cage induction machine model is employed to model the induction generator. The model is basically a linear induction machine model including a frequency (or slip) dependent rotor impedance, as depicted in Fig. 2. The mathematical equations describing the d-q model of the induction generator are given in [5].

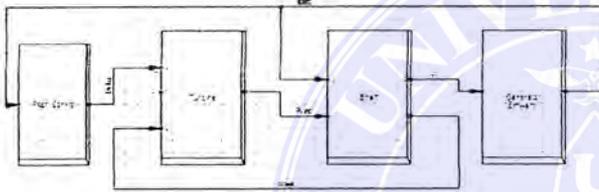


Fig. 1. Dynamic block diagram for generic Type A wind turbine

The winding resistance R_s , the stator leakage reactance X_s , the magnetizing reactance X_m and the rotor impedance Z_{rot} characterize the model. The Z_{rot} can be frequency dependent and allows therefore for modeling squirrel-cage induction machines over a wide range. Z_{rot} can be approximated by series R-L elements. This model initializes itself to match the terminal power of the machine to the power of the generator in the load flow case. The slip and reactive power consumption of the induction machine are determined as needed to match the specified power. For transient analysis, the inertia, specified by the acceleration time constant (rated to nominal mechanical power at nominal speed) needs to be entered additionally.

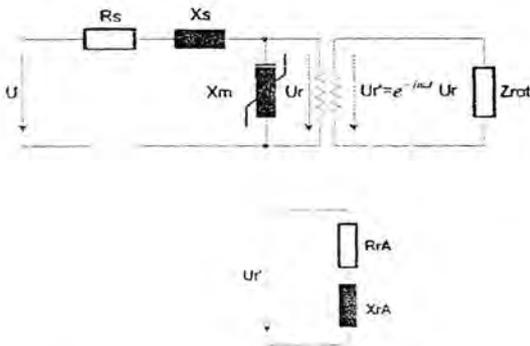


Fig. 2. Squirrel-cage induction machine model in "PowerFactory"

III. MODELING OF THE SQUIRREL-CAGE INDUCTION GENERATOR FOR STEADY STATE SHORT CIRCUIT ANALYSIS

According to the IEEE/ANSI method, the induction generator in short-circuit calculations is represented as a 1 pu voltage source in series with the direct axis sub-transient inductance X_d'' . Both the positive and negative sequence impedances for the induction generator are taken to be equal to X_d'' . Knowing the induction generator locked rotor current $I_{locked\ rotor}$ when it is tested as an induction motor, the value of X_d'' can be calculated by (1).

$$X_d''(pu) = \frac{1}{I_{locked\ rotor}(pu)} \tag{1}$$

In other words, for a three-line to ground fault at the turbine low voltage bus, each phase of the turbine contributes approximately a maximum symmetrical short-circuit current with a magnitude equals to the induction generator locked rotor current during the first cycle after the fault.

Using this model for the induction generator, the collector representation for short-circuit calculations is shown in Fig. 3.

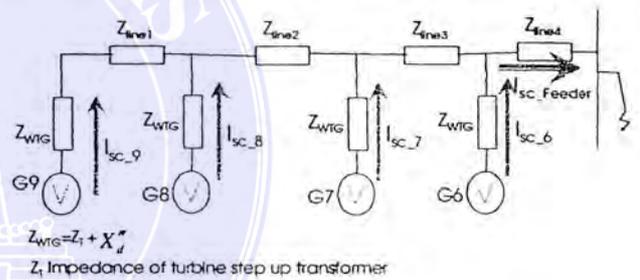


Fig. 3. Collector representation for short-circuit calculations

IV. CALCULATING EQUIVALENT IMPEDANCE FOR THE WIND POWER PLANT

There are ongoing efforts to develop equivalent representations of WPP for different power system planning studies. The building of an equivalent circuit of WPP for power flow analysis has been introduced in [6].

For short-circuit analysis at the transmission level, it is not practical to model the WPP in detail. Rather, an equivalent impedance behind a 1 pu voltage source can be used. A set of procedures has been developed to include the effect of a newly installed WPP on the protection settings of the HV/MV transmission network. The procedures can be summarized in the following points:

1. A detailed model for the WPP is constructed. The model includes exact representation for the collector system including wind turbines, padmount transformers, cables, and overhead lines. Such models can be built in many commercially available software packages.

Fig. 2. Squirrel-cage induction machine model in "PowerFactory"

- The model is used to determine the plant three-line to ground and single-line to ground short-circuit currents at the LV side of the plant main substation. These calculations are performed with the breaker on the LV side of the substation transformer opened, i.e., the only source for the short-circuit currents is the WPP.
- Using the E/Z simplified method given in [3], short-circuit currents are then used to obtain the equivalent positive sequence and zero sequence impedances of the plant by using (2) and (3) respectively.

$$Z_1 = Z_2 = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} * I_{3LG}} \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{3V_{LN}}{I_{SLG}} - 2Z_1 \quad (3)$$

where Z1, Z2 and Z0 are the WPP equivalent positive, negative and zero sequence impedances in ohms, VLN is the rms phase voltage in kV, VLL is the rms line voltage in kV, I3LG is the calculated three-line to ground rms current and I1LG is the calculated single-line to ground rms current in kA.

- The WPP is represented as a voltage source with 1 pu voltage and a series impedance with the corresponding Z1 and Z0. It should be noted that the substation transformer has not been included in the equivalent impedance to make it easier for the protection engineer to investigate the effect of different transformer connection types on the contribution of the WPP to the fault level at the HV/MV transmission network. The resulting equivalent circuit is shown in Fig. 4. The obtained equivalent impedances can be used later in short-circuit calculations for relay settings in the transmission network.

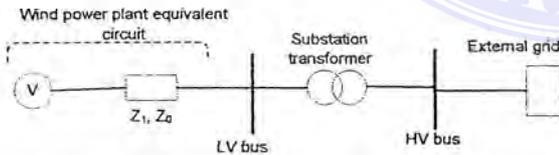


Fig. 4. Equivalent circuit used for calculating wind power plant short-circuit contribution to the transmission network

- The fault analysis mentioned in the previous points is based on the IEEE/ANSI calculation method for symmetrical AC short-circuit currents using a set of linear algebraic equations and does not include the dc component, which is seldom required for the application and setting of protective relays.

V. CASE STUDIES

The transient and steady-state short-circuit current calculations of a typical WPP are illustrated on a sample 50 MW

plant. The one-line diagram for the WPP is shown in Fig. 5. The plant consists of 20 Type A wind turbines each rated at 2.5 MW. The detailed WPP has been built and simulated using "PowerFactory" software [4]. The induction generator parameters used in the simulation are given in Table I. It is assumed that $I_{locked\ rotor} = 5\ pu$, hence $X_d' = 0.2\ pu$ using (1). The data assumed for the substation transformer is given in Table II. Short-circuit data for the 230 kV network is given in Table III.

A parallel capacitor bank is installed at each generator LV bus for zero VAR interchange at the generator padmount transformer HV side. To achieve the zero VAR interchange the capacitor bank size was set to 1.35 MVAR. Load flow summary results are given in Table IV assuming all wind turbines are supplying their maximum power.

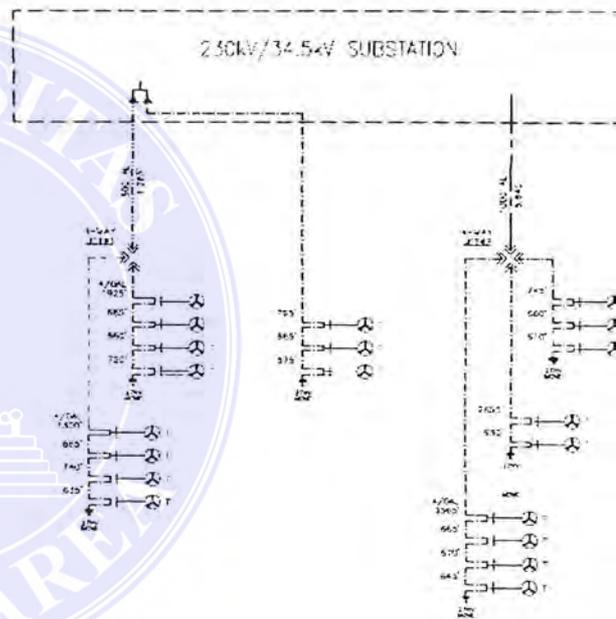


Fig. 5. One-line diagram for the 50 MW wind power plant

TABLE I
SQUIRREL-CAGE INDUCTION GENERATOR PARAMETERS

Parameter	Value
Nominal voltage [kV]	0.575
Rated power	2.5 MW
Efficiency at nominal operation %	97%
Acceleration time constant [sec]	0.5 sec
Number of pole pairs	2
Stator resistance Rs [pu]	0.0122
Magnetic reactance Xm [pu]	6.8825
Stator reactance Xs [pu]	0.2002
Rotor resistance RrA [pu]	0.013
Rotor reactance XrA [pu]	0.1256
Connection type	Y
Rated power factor Pf	0.897 lagging

Document Accepted 19/9/23

TABLE II
DATA FOR THE 50 MW WIND POWER PLANT SUBSTATION TRANSFORMER

Transformer type	2-winding three phase	
Rated power	50 MVA	
Nominal Frequency	60 HZ	
Rated voltage	HV-Side	230 kV
	LV-Side	34.5 kV
Positive sequence impedance	Short-Circuit Voltage uk	11%
	Copper losses	150 kW
Zero sequence impedance	Absolute	11%
	Resistive Part	0.5%
Vector group	HV-Side	D
	LV-Side	YN (zero ground impedance)
	Phase shift	30°

TABLE III
SHORT-CIRCUIT DATA FOR THE 230 KV NETWORK

SK" (MVA short-circuit power)	1500 MVA
Ik" (Symmetrical Sub-transient short circuit current) three-phase to ground fault	3765 A
Ik" (Symmetrical Sub transient short circuit current) single-phase to ground fault	2340 A
X/R ratio	10
Z2/Z1	1
X0/X1	2.65
R0/X0	0.45

TABLE IV
LOAD FLOW RESULTS FOR THE 50 MW WIND POWER PLANT WITH LOCAL CAPACITOR BANKS FOR REACTIVE POWER COMPENSATION

Supplied Active Power	49.58 MW
Absorbed reactive power	4.91 MVAR
Pf of the Wind Power Plant	0.995 lagging
Substation HV bus voltage	1 pu
VAR supplied by the capacitor bank of the induction generator	1.35 MVAR

A. Three-Line to Ground Fault

Short circuit calculations for a three-line to ground fault at the substation 34.5 kV bus based on the IEEE/ANSI calculation method are given in Table V. These calculations are performed while the circuit breaker on the LV side of the substation transformer is opened to obtain the contribution of only the WPP.

We next perform electromagnetic transient simulations, assuming a three-line to ground fault occurs at 1.5 sec and lasts for 0.2 sec and is then cleared. The waveforms for the plant short-circuit current are shown in Fig. 6. The simulation has been performed with the 230 kV network connected.

It can be seen from the waveforms that the plant short-circuit current decays as given in Table VI. Short-circuit current waveforms of one of the induction generators injected to its 0.69 kV bus are shown in Fig. 7.

It should be noted that peak values of the asymmetrical short-circuit current obtained from transient simulations are different than the symmetrical short-circuit current obtained from short-circuit calculations, as these peaks are a function of the fault instant and they include the dc component.

TABLE V
WIND POWER PLANT SHORT CIRCUIT CONTRIBUTION FOR A 3-LINE TO GROUND FAULT AT THE 34.5 KV BUS WITH THE 230 KV NETWORK DISCONNECTED

Description	Wind plant contribution	
SK" (MVA short-circuit power)	157.186 MVA	
Ik" (Symmetrical Sub transient short circuit current)	Phase A	2630 A <-83.37 deg
	Phase B	2630 A <-83.37 deg
	Phase C	2630 A <-83.37 deg
	+SEQ	2630 A <-83.37 deg
	-SEQ	0
	OSEQ	0

TABLE VI
DECAY OF WIND POWER PLANT SHORT CIRCUIT CURRENT FOR A 3-LINE TO GROUND FAULT AT THE 34.5 KV BUS WITH THE 230 KV NETWORK CONNECTED

No. of cycles after fault	Current peak value	Percentage of rated current peak value (1167 A)
Max value after fault instant	6400 A	548%
3 cycles	3331 A	285%
6 cycles	1560 A	134%
9 cycles	780 A	67%

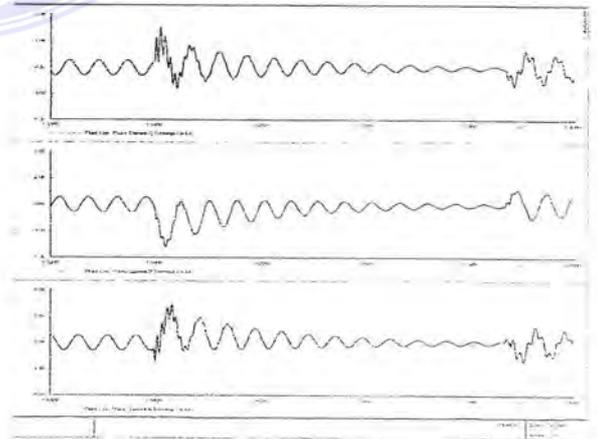


Fig. 6. Injected current from the wind power plant to substation LV bus
Fault type: three-line to ground fault at the 34.5 kV bus